



Patrícia Alexandra Francisco Lopes

Licenciatura em Ciências de Engenharia Física

Arborescência Elétrica em Cabos Subterrâneos de Média Tensão

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Física

Orientadores: Rui Filipe Lobo, Professor Associado com Agregação,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa
Jorge Simões Alves, Engenheiro,
EDP Labelec

Júri

Presidente: Prof. Dra. Maria Isabel Catarino
Arguente: Prof. Dr. Mário Ventim Neves
Vogal: Prof. Dr. Rui Filipe Lobo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

*A todos aqueles que lutam para que a ciência e conhecimento
não fiquem presos na mente dos homens.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Professor Rui Filipe Lobo, por me ter incentivado a explorar um tema sobre o qual não tinha informação, ter partilhado o seu conhecimento e acompanhado todas as fases deste longo trabalho.

Ao Engenheiro Simões Alves, orientador na empresa, por ter respondido às diversas divagações do meu ser aquando a aquisição e tratamento de dados na empresa, sempre com a porta aberta para mais uma dúzia de questões.

À Mestre Engenheira Filipa Bernardes e ao Doutor Engenheiro Filipe Inok por todo o apoio prestado durante esta investigação, sem eles não a teria conseguido finalizar com tanto brio.

Aos meus colegas da Labelec por me terem dado o melhor acolhimento que uma não estagiária pode desejar, sempre prontos para me ajudar a qualquer altura do dia.

Aos meus pais e irmã que sempre acreditaram em mim e mostraram que com esforço e dedicação não há impossíveis, sem vocês não teria chegado aqui.

Aos meus amigos de sempre, e àqueles que a vida trouxe nestes últimos anos, por me acompanharem nesta jornada que foi o princípio do fim da minha vida de estudante.

Por último mas não menos importante, às minhas pessoas, e a ti Sofia, que mesmo deixando de me ver todos os dias, me chamaram à razão sempre que eu queria desistir de finalizar este grande curso que é Engenharia Física.

Um Grande Obrigada,
Patrícia Lopes

*"Strength does not come from physical capacity. It comes from
an indomitable will."
Mahatma Gandhi*

Resumo

A rede elétrica portuguesa tem cabos subterrâneos com mais de 30 anos de serviço, e num mundo cada vez mais dependente de eletricidade é necessário um maior controlo das condições do seu transporte, de modo a evitar falhas e garantir uma distribuição eficiente e segura para os milhões de pessoas que dependem dela no seu quotidiano.

Estes cabos estão sujeitos a variações de temperatura, níveis de humidade e esforço elétrico, enfrentando ainda o envelhecimento dos seus componentes e o surgimento de problemas na isolamento como: arborescências de água e/ou elétricas, vacúolos entre outros.

De modo a controlar a condição dos cabos subterrâneos a EDP Labelec, laboratório pertencente ao grupo Energias de Portugal, realiza testes químicos e elétricos à sua isolamento, devido a avarias ou a substituições de segmentos na rede. O objetivo deste estudo é otimizar estes ensaios, para que seja feita uma avaliação mais precisa e eficiente nos diversos casos.

Recorrendo à espectroscopia no domínio da frequência avaliou-se a variação da permitividade complexa relativa e do índice de perdas dielétricas para diferentes fabricantes de cabos, nível de tensão suportada e o comprimento dos mesmos, concluindo-se que é necessário adaptar o método de avaliação atualmente utilizado pela empresa, uma vez que não se pode considerar existir apenas um valor padrão para cada gama de tensão mas sim para cada fabricante.

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de Nanofísica/Nanotecnologia e Energia, campus da Caparica, FCT-NOVA, e nas instalações da EDP Labelec, em Sacavém.

Palavras-chave:

- Cabos Isolados de Energia
- Cabos Subterrâneos de Média Tensão
- Isolação Elétrica

-
- Rutura Dielétrica
 - Arborescência
 - Ensaios no Domínio da Frequência
 - Ensaios Laboratoriais
-

ABSTRACT

Abstract

The Portuguese power grid has underground cables with more than 30 years of service, and in a world increasingly dependent of electricity, it is necessary to control the conditions of its transportation to avoid failures and ensure an efficient and safe distribution to the million people that depend of electricity on their daily lives.

These cables are submitted to a few variations including temperature, humidity levels and electrical stress, in addition to the ageing of components there are other problems in insulation such as: water and/or electric treeing, vacuoles among other.

In order to control the condition of underground cables, EDP Labelec, a laboratory that belongs to the Energias de Portugal group, performs chemical and electrical tests on its insulation, due to failures or replacements of segments in the grid. This study aims to optimize these tests, so that a more precise and efficient evaluation can be made.

Frequency Domain Spectroscopy was used to evaluate the variation of the relative complex permittivity and the index of dielectric loss for different cable manufacturers, the supported voltage level and their length, and concluded that it is necessary to adapt the current evaluation method by the company, since it cannot be considered that there is only one standard value for each voltage range, but for each manufacturer.

This work was developed in the Nanophysics/Nanotechnology and Energy laboratory, Caparica campus, FCT-NOVA, and at EDP Labelec's facilities in Sacavém.

Keywords:

- Power Cable Insulation
- Medium Voltage Underground Cables
- Electrical Insulation
- Dielectric Rupture
- Treeing

-
- Frequency Domain Trails
 - Lab Tests
-

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Glossário	xix
Símbolos e Abreviaturas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos	2
1.3 Estrutura	2
2 Cabos Subterrâneos MT - Características Construtivas	3
2.1 Alma Condutora	4
2.2 Isolação	4
2.3 Blindagem	6
2.4 Bainha Exterior	7
2.5 Aspetos Alternativos	7
3 Problemas na Isolação	9
3.1 Vacúolos	10
3.2 Arborescência de Água	10
3.3 Arborescência Elétrica	11
3.4 Outros aspetos a considerar	12
4 Ensaios	13
4.1 Ensaios Químicos	14
4.1.1 Ensaio com Glicerina	14
4.1.2 Ensaio com Azul de Metileno	15
4.2 Ensaio Físico	16
5 Resultados Experimentais	21

ÍNDICE

5.1	Ensaio com Glicerina	21
5.2	Ensaio com Azul de Metileno	22
5.3	Ensaio Físico	22
5.3.1	Amostra A1	24
5.3.2	Amostra A2	25
5.3.3	Amostra D1	26
5.3.4	Comparação entre Amostras	28
5.4	Comparação com Amostras já Analisadas pela Empresa	29
6	Conclusões	31
	Bibliografia	33
A	Apêndice 1 - Dados Experimentais	35
I	Anexo 1	43
II	Anexo 2	45

LISTA DE FIGURAS

2.1	Constituição típica cabos MT [2]	3
2.2	Efeito da camada SC adaptado de [8]	6
3.1	Defeitos típicos na isolação [12]	9
3.2	Problemas na isolação: Vacúolos [CL]	10
3.3	Problemas na isolação: Arborescência aberta (esquerda) arborescência fechada (direita)[15]	11
3.4	Problemas na isolação: Arborescência Elétrica [CL]	11
4.1	Blindagem Metálica totalmente oxidada [CL]	13
4.2	Preparação de Amostras para Ensaio com Glicerina	14
4.3	Ensaio com Glicerina, montagem e resultado [CL]	15
4.4	Ensaio com Glicerina numa Amostra Semi-Opaca [CL]	15
4.5	Exemplo de Ensaio com Azul de Metileno [17]	16
4.6	Representação do circuito equivalente do cabo, representação de I e δ	16
4.7	Curva $\tan(\delta)$ vs Frequência, para um Cabo Novo com 6 m, adaptado de [18]	18
4.8	Aparelho utilizado: Dirana	18
4.9	Esquema de ligações para Ensaio Físico [20]	18
5.1	Exemplo de Arborescência Elétrica	21
5.2	Diferenciação de espessuras nas amostras	22
5.3	Comparação modo <i>Standard</i> vs <i>Improved</i> [CL]	23
5.4	Efeito da diminuição do comprimento, amostra A1	24
5.5	Efeito da diminuição do comprimento, Amostra A2	25
5.6	Gráficos de comparação das amostras A1 e A2	26
5.7	Efeito da diminuição do comprimento, amostra D1	27
5.8	Gráficos de comparação amostras A1 e D1	27
5.9	Comparação ε'' a 100 mHz	28
5.10	Comparação ε'' a 50 Hz	29
A.1	Comparação da $\tan(\delta)$ das 3 amostras a 100mHz	40
A.2	Comparação da $\tan(\delta)$ das 3 amostras a 50Hz	40

I.1	Simbologia - Campo Descritivo dos Materiais Constituintes de um Ccabo MT [21]	44
II.1	Descrição Resumida do Ensaio com Glicerina	46
II.2	Dados Técnicos Dirana	47

LISTA DE TABELAS

2.1	Caraterísticas típicas do condutor	4
2.2	Comparação Polietileno	5
4.1	Exatidão do software Dirana 1.6	18
5.1	Identificação das amostras	24
5.2	Média de valores a 100 mHz	29
5.3	Média de valores obtidos a 50 Hz	29
5.4	Média de valores obtidos a 100 mHz, excluindo amostras com problemas de- tetados na isolação	30
5.5	Média de valores obtidos a 50 Hz, excluindo amostras com problemas de- tetados na isolação	30
A.1	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 10 mHz	35
A.2	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 50 mHz	35
A.3	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 100 mHz	36
A.4	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 500 mHz	36
A.5	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 1 Hz	36
A.6	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 5 Hz	37
A.7	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 10 Hz	37
A.8	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 50 Hz	37
A.9	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 100 Hz	38
A.10	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 500 Hz	38
A.11	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 1 kHz	38
A.12	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 100 mHz	39
A.13	Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 50 Hz	39
A.14	Valores RC [s] a 100 mHz	39
A.15	Valores RC [ms] a 50 Hz	39
A.16	Média de valores, a 100 mHz	40
A.17	Média de valores obtidos, a 50 Hz	41
I.1	Comparação Temperaturas Suportadas para os Diversos Polímeros de Isolação	43

GLOSSÁRIO

Alta Tensão	Tensões compreendidas entre os 36kV e os 150 kV.
Digital Signal Processor	São microprocessadores especializados em processamento digital de sinal usados para anular o ruído do sinal detetado.
Média Tensão	Tensões compreendidas entre os 1kV e os 36 kV.
Secção Nominal	A secção nominal é aproximadamente igual à soma das áreas das secções transversais de seus fios, a cada valor de secção é correspondido um determinado valor máximo de resistência elétrica para o condutor.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

δ	Ângulo de perdas dielétricas.
ω	Frequência angular (rads^{-1}).
ε''	Parte imaginária da permissividade absoluta (Fm^{-1}).
ε_r''	Parte imaginária da permissividade complexa relativa - Índice de perdas dielétricas.
ε_r'	Parte real da permissividade complexa relativa.
ε_0	Permissividade no vácuo (Fm^{-1}).
ε_r	Permissividade relativa.
I_c	Corrente capacitiva(A).
I_r	Corrente resistiva(A).
AT	Alta Tensão.
C	Capacitância do condensador (F).
CL	Cortesia Labelec.
f	frequência (Hz).
FDS	<i>Frequency Domain Spectroscopy</i> - Espectroscopia no domínio da frequência.
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> - Polietileno de Alta Densidade.
I	Corrente elétrica(A).
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i> - Polietileno de Baixa Densidade.
MT	Média Tensão.
PE	<i>Polyethylene</i> -Polietileno.

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i> - Policloreto de Vinil.
R	Resistência (Ω).
SC	Semicondutor.
TR-XLPE	<i>Tree Retardant - Cross-Linked Polyethylene</i> - Polietileno Reticulado com retardador de arborescência.
U	Tensão elétrica(V).
WT	<i>Water tree</i> .
XLPE	<i>Cross-Linked Polyethylene</i> - Polietileno Reticulado.

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O isolamento do condutor foi desde sempre uma preocupação no fabrico de cabos elétricos, tanto a nível de segurança como de bom funcionamento elétrico do mesmo.

Ao longo de décadas foram utilizados vários materiais, desde borrachas e material vegetal a papel impregnado a óleo. O papel foi utilizado na isolação pela primeira vez em 1882 quando Thomas Edison desenvolveu a primeira rede de iluminação pública.

O papel impregnado em óleo fluido foi utilizado em grande escala no século XIX e XX e ainda hoje podem ser encontrados cabos com este material de isolação nas redes de alta tensão (AT), rede com tensões de serviço entre 30 e 60 kV.

Com o avanço tecnológico vieram os isolantes termoplásticos, os elastómeros e os polímeros reticulados que permitem um melhor desempenho a altas temperaturas sendo hoje utilizados o polietileno, polietileno reticulado e policloreto de vinilo, entre outros.

Atualmente o isolamento já não é composto apenas por uma camada mas sim por três, aplicadas num processo de tripla extrusão (do semicondutor interior, isolação e semicondutor exterior) que tem extrema importância no fabrico neste tipo de cabos.

Esta dissertação aprofunda o conhecimento sobre os diversos problemas existentes na isolação, principalmente as arborescências elétricas, já detetados na rede nacional de cabos subterrâneos de média tensão.

A EDP Labelec tem o programa MCCS - monitorização da condição de cabos subterrâneos, que desde 2012 avalia a condição de cabos e caixas de junção com a finalidade de precaver futuras falhas na rede. Esta rede é trifásica pelo que existe uma necessidade acrescida de uma boa isolação, tanto elétrica como mecânica.

1.2 Motivação e Objetivos

Atualmente a Energia Elétrica é indispensável para o bom funcionamento do nosso país, desde habitações a instituições públicas como hospitais e escolas, sendo imprescindível uma boa distribuição da mesma.

Tendo em conta a expansão da rede subterrânea nacional e a contínua necessidade de melhoria torna-se propício um novo olhar aos métodos com que se analisam os cabos de forma a otimizar o serviço prestado.

Com este novo olhar pretende-se então:

- Compreender os problemas detetados na isolação do cabo, especialmente as arborescências elétricas
- Otimizar a utilização dos métodos de diagnóstico existentes
- Analisar os resultados dos vários métodos

Através deste estudo pretende-se então aumentar a qualidade e eficiência do serviço prestado, ao mesmo tempo que se rentabiliza o uso dos recursos da empresa.

1.3 Estrutura

A presente dissertação divide-se em 6 capítulos, sendo o presente destinado à apresentação do tema em foco.

No 2^o capítulo encontra-se a constituição do cabo MT, sendo referidos alguns dos aspetos mais importantes do seu fabrico.

Os problemas detetados na isolação estão descritos no capítulo 3, dando ênfase às arborescências e vacúolos.

No 4^o capítulo são apresentados os ensaios realizados na empresa bem como o ensaio complementar estudado para ser implementado futuramente.

Os resultados expostos no capítulo 5 são fruto dos ensaios realizados durante este estudo bem como alguns dados provenientes da monitorização realizada pela empresa.

Por último são indicados alguns possíveis estudos futuros, bem como as principais conclusões deste trabalho.

CABOS SUBTERRÂNEOS MT - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Desde o século XVIII, fios e cabos condutores sofrem um desenvolvimento brutal passando da transmissão de mensagens de telégrafo com alguns quilômetros para uma rede elétrica que permite suportar não só a iluminação pública, mas o dia-a-dia de milhões de pessoas.

Os condutores, energéticos ou não, foram desde muito cedo constituídos por três partes distintas: alma condutora, isolamento interna e bainha externa, sendo o segundo o componente o que sofreu maior alteração com o descobrimento de novos materiais isolantes como a fibra de vidro, borracha e o papel.[1]

A produção dos cabos, desde a alma condutora até à bainha exterior está sujeita a normas nacionais e internacionais sendo que os fabricantes têm ensaios de controlo de qualidade desde a produção do condutor até ao produto final.

Os cabos MT, atualmente, são constituídos por:

1. Alma condutora
2. Blindagem da alma condutora
3. Isolação
4. Blindagem da isolamento
5. Bainha exterior

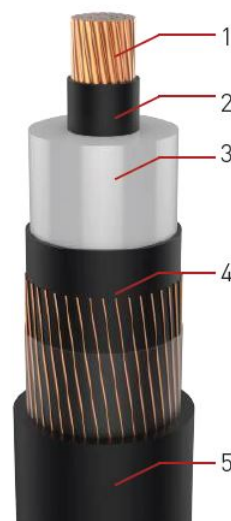


Figura 2.1: Constituição típica cabos MT

2.1 Alma Condutora

A alma condutora dos cabos MT era, originalmente, de cobre mas têm vindo a ser substituído por alumínio, uma vez que através de um aumento de secção nominal é possível manter a condutância, suportar iguais valores de tensão e limitar as perdas devidas ao aquecimento. Algumas características típicas destes condutores estão indicadas na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Caraterísticas típicas do condutor

Características	Cobre (recozido)	Alumínio ($\frac{3}{4}$ duro)
Grau de pureza (%)	>99.9	>99.5
Densidade ($kg/(km^3)$)	8.89	2.70
Resistividade a 20°C ($\Omega.mm^2/m$)	17.24×10^{-3}	28.26×10^{-3}
Coeficiente da dilatação linear (C^{-1})	17×10^{-6}	23×10^{-6}
Coeficiente da variação resistência óhmica com a temperatura. (C^{-1})	3.93×10^{-3}	4.03×10^{-3}
Ponto de fusão (°C)	1080	660
Condutividade elétrica (W/cm.°C)	3.8	2.4
Tensão mecânica de rotura *(MPa)	220 a 250	120 a 205
Modulo de elasticidade (N/mm^2)	26	14
Alongamento à rotura (%)	20 a 40	1 a 4

* A tensão de rotura depende do grau de pureza do material escolhido que varia nos diversos fabricantes de cabos elétricos, sendo a gama apresentada a junção dos valores dos mesmos

Apesar do alumínio permitir uma redução no custo de produção existem situações em que continua a ser preferível a utilização do cobre como condutor uma vez que precisa de uma menor secção nominal para obter a mesma resistência a 20°C.

2.2 Isolação

A isolação, tal como o nome indica tem como principal objetivo isolar a alma condutora do exterior, tanto a nível elétrico como a nível mecânico. No último século houve um enorme desenvolvimento dos materiais isolantes, o que permitiu uma maior variedade de compostos dielétricos sólidos. Materiais como o Polietileno e o Policloreto de Vinil, ambos termosplásticos, e o Polietileno reticulado ou a borracha de silicone que são elastómeros também conhecidos como polímeros reticuláveis. Todos estes materiais tem uma rigidez dielétrica superior à do ar e à do papel impregnado a óleo, pelo que as descargas parciais são reduzidas.

Polietileno

O polietileno é o polímero mais simples quimicamente, e provem da polimerização do etileno. Devido à sua utilização em grande escala o seu custo de produção é muito baixo. As

Tabela 2.2: Comparação Polietileno

Características	LDPE	HDPE	XLPE
Densidade (g/cm^3)	0.92	0.95	0.92
Rigidez dielétrica (kV/mm)	75	100	50
Permitividade relativa (1 kHz)	2.3	2.35	2.3
Resistividade Volumétrica ($\Omega\cdot\text{cm}$)	5×10^{17}	5×10^{17}	10^{16}
Fator de dissipação (1 kHz)	2×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}
Resistência a tração (N/mm^2)	12	15	20
Modulo de elasticidade	0.15	0.7	0.1

principais vantagens do polietileno são a sua alta rigidez dielétrica, baixa permitividade relativa, baixo fator de dissipação e alta resistividade volumétrica.

Através de diferentes processos de polimerização é possível alterar a densidade do polietileno. Esta alteração varia também outras propriedades, como a sua resistência à tração e módulo de elasticidade. São assim originados o polietileno de baixa densidade e de alta densidade sendo o primeiro utilizado na isolação de cabos de AT.[3]

Polietileno Reticulado

O polietileno reticulado provém geralmente do polietileno de baixa densidade sendo o objetivo da reticulação a inibição do movimento das moléculas, umas em relação às outras sob a estimulação do calor o que proporciona uma estabilidade melhorada em temperaturas elevadas quando comparada com os materiais termoplásticos, ver tabela no anexo I. [4, 5]

O polietileno reticulado suporta então temperaturas mais elevadas sem perder as suas propriedades elétricas iniciais o que permite ser utilizado em tensões não alcançadas pelo polietileno comum sendo também uma melhoria face ao PVC, que apenas permite um bom isolamento a baixas tensões.

Existe também um polietileno reticulado com retardador de arborescência, TR-XLPE, que através da adição de um aditivo aquando a reticulação do polietileno torna o polímero mais resistente à formação de arborescências, tanto de água como elétricas, já utilizado em Portugal. Estando em estudo um melhoramento deste isolante, *enhanced* TR-XLPE (ETR-XLPE). [6]

Policloreto de Vinil

O policloreto de vinil tem boas características elétricas, rigidez dielétrica e resistência de isolamento, no entanto possui elevada permitividade elétrica e índice de perdas dielétricas, o que se torna problemático a tensões mais elevadas. Apesar de ser mais resistente à chama do que o PE, quando entra em combustão liberta gases nocivos pelo que não é utilizado como isolação em cabos com tensão superior a 10 kV.

2.3 Blindagem

Blindagem da Alma Condutora

A alma condutora é revestida, por extrusão, com uma camada semicondutora (SC) de modo a uniformizar o campo elétrico. Com a aplicação desta camada o campo elétrico vai deixar de ser influenciado pela superfície irregular da alma condutora prevenindo a acumulação de carga num ponto específico do condutor. [7] Usualmente são utilizados materiais isolantes, termoplásticos e elastómeros, que uma vez tratados quimicamente são transformados em semicondutores. [8]

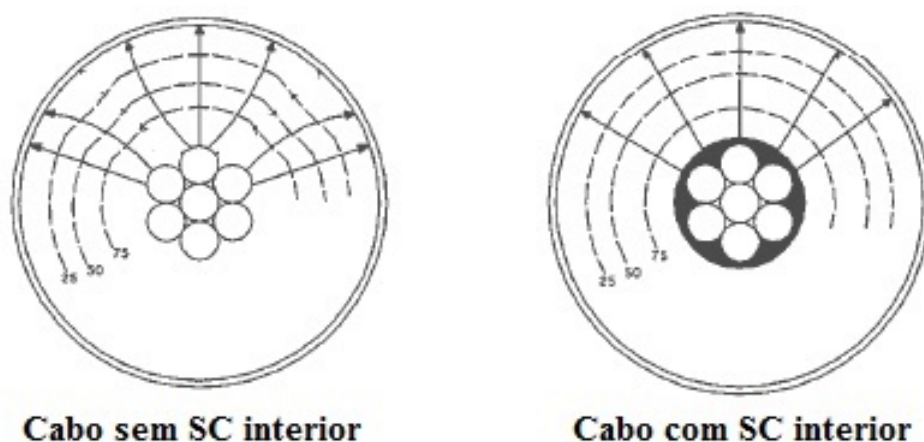


Figura 2.2: Efeito da camada SC adaptado de [8]

Blindagem da Isolação

A blindagem da isolação é composta por duas partes distintas: metálica e não metálica. Enquanto que a parte não metálica tem como finalidade a uniformização do campo elétrico e a proteção da isolação, a metálica funciona como condutor à terra das correntes de curto-circuito e capacitivas, evitando o efeito de coroa e/ou descargas parciais.

A parte não metálica pode ser um semicondutor pelável, normalmente polietileno aditivado com carbono, ou uma fita semicondutora que é sobreposta em hélice à isolação.

A parte metálica pode ser constituída por fita ou fios de alumínio ou cobre, sendo comum utilizar ambos. Os fios são sobrepostos à camada semicondutora de modo a criar uma superfície equipotencial, de modo a curto-circuitar estes fios é aplicada uma fita do mesmo material em contra hélice sobre estes. Os fios que inicialmente têm espaço entre eles passam a estar ligados pela fita, que estando ligada á terra garante a segurança das pessoas em caso de perfuração escoando também a corrente de retorno. [9]

Todos os cabos são identificados segundo os seus constituintes, havendo distinção nos diferentes tipos de blindagem metálica. No anexo I estão apresentadas as diferentes designações segundo a norma portuguesa e a norma espanhola.

2.4 Bainha Exterior

A bainha externa tem como funcionalidade proteger mecânica e quimicamente o cabo. Inicialmente era utilizado o PVC dando no entanto lugar a outros materiais termoplásticos como o polietileno de baixa densidade e a poliolefina, que torna o cabo mais maleável e mais resistente à penetração de água devido à sua força de superfície. [7]

2.5 Aspetos Alternativos

Dependendo dos fabricantes existem outros materiais que se podem utilizar na constituição dos cabos, exemplo disso são as fitas hidroexpansivas, que podendo ser colocadas imediatamente sobre o condutor ou da blindagem metálica proporcionam uma barreira para a infiltração da água. São empregues também fitas de fixação que permitem uma melhor aderência entre as diferentes camadas do cabo. [10]

PROBLEMAS NA ISOLAÇÃO

A isolação na média tensão, tal como referido no capítulo anterior, maioritariamente composta por polietileno reticulado é aplicada no condutor por tripla extrusão simultânea com as duas camadas semicondutoras adjacentes. A reticulação do polietileno é processada em continuo durante a extrusão em atmosfera seca e sobreaquecia em azoto, *dry-curing*. [11]

O processo de tripla extrusão simultânea permite uma melhor aderência entre as camadas e reduz o risco de defeitos na superfície interna e externa da isolação, defeitos que com o passar do tempo podem levar à quebra do isolamento.

Neste capítulo expõem-se os problemas detetados na rede subterrânea do nosso país.

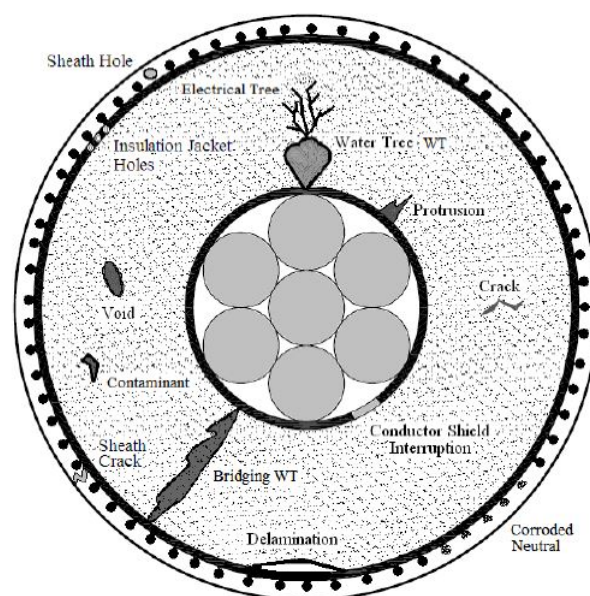


Figura 3.1: Defeitos típicos na isolação [12]

3.1 Vacúolos

Os vacúolos, figura 3.2, são bolhas de ar presentes no material isolante e podem surgir de duas formas distintas, aquando a reticulação do polietileno ou por uma exposição prolongada num ambiente húmido em serviço.

Tal como referido acima, o processo de tripla extrusão permite diminuir os defeitos entre camadas e a reticulação a seco um decréscimo do número de vacúolos quando comparada com a reticulação por vapor de água. No entanto, o interior da isolação é arrefecido mais depressa do que o exterior, motivo pelo qual os gases ficam retidos no material e dão origem a uma degradação precoce do cabo.



Figura 3.2: Problemas na isolação: Vacúolos [CL]

A degradação inicia-se assim que o cabo é sujeito a tensão, uma vez que a rigidez dielétrica do gás presente no vacúolo é menor do que a do polímero, são criados pontos de esforço elétrico onde se dão descargas parciais, levando a um deterioramento do material, inclusive á rotura do mesmo.

A exposição prolongada num ambiente húmido desencadeia o mesmo processo, uma vez que o oxigénio faz com que pequenos defeitos se expandam com o esforço elétrico e comprometam o isolamento total do cabo.

3.2 Arborescência de Água

As arborescências de água podem surgir do mesmo modo que os vacúolos, defeitos de fabrico e/ou presença de muita humidade, mas também por inserção do SC na isolação. [13] No entanto, enquanto os vacúolos são preenchidos por gases estas estruturas ramificadas são preenchidas por água o que leva a uma falha prematura da isolação, sendo possível originar arborescências elétricas. [14]

As arborescências, assim chamadas devido à sua semelhança com pequenas árvores, figura 3.3, podem surgir na fronteira com o SC ou no interior da isolação, arborescência aberta e arborescência fechada respetivamente, e ambas progridem no sentido do campo elétrico diminuindo o valor da tensão de disrupção do material dielétrico.



Figura 3.3: Problemas na isolação: Arborescência aberta (esquerda) arborescência fechada (direita)[15]

Apesar de ambos os tipos de arborescência de água levarem a um deterioramento da condição da isolação, as fechadas têm um crescimento mais rápido comparativamente às abertas, no entanto, esse crescimento é limitado pelo que são menos prejudiciais.

As arborescências fechadas atingem rapidamente o seu tamanho máximo, mantendo o mesmo durante toda a vida útil do cabo, já as abertas podem em poucos anos atingir a extremidade oposta onde se iniciaram crescendo a uma taxa de 10 a 1000 μm por ano.[11]

3.3 Arborescência Elétrica

Arborescências elétricas são originadas pelo esforço elétrico excessivo, os defeitos e impurezas existentes no material começam a ter pequenas descargas elétricas dentro das suas paredes e originam uma ramificação carbonizada. Abrem assim diversos ramos, enfraquecendo a resistência volumétrica do polímero levando à perfuração total da isolação. [11, 16] Este fenómeno é exclusivamente elétrico, não existindo a presença de gases ou água no interior das ramificações, figura 3.4.



Figura 3.4: Problemas na isolação: Arborescência Elétrica [CL]

3.4 Outros aspetos a considerar

Os defeitos de fabrico não são, portanto, os únicos problemas que a isolação enfrenta. O envelhecimento, a sobrecarga e as condições ambientais são propícios a gerar outro tipo de defeitos no material dielétrico, tal como referido acima.

Na figura 3.1 podemos ainda identificar outros problemas existentes na isolação, como os contaminantes, fendas e inserções do semicondutor - *protusion*, os primeiros dois podem ser provenientes de mau manuseamento aquando colocados no subsolo. Curvaturas apertadas e tração prolongada aumentam a possibilidade de quebra na bainha externa traduzindo-se numa ameaça à eficiência do cabo. [12]

Existe ainda um aspeto secundário da isolação, a alteração da sua cor, cuja causa não é conhecida mas já se sabe interferir com as propriedades químicas da isolação. A camada isolante, que de fabrico é branca, toma cores acastanhadas e esta mudança de cor levou à criação de três grupos na caracterização da isolação: branca, semi-opaca e opaca; este é um aspeto a ter em conta nos ensaios químicos referidos no capítulo 4.

ENSAIOS

A condição da isolação é extremamente importante no bom funcionamento dos cabos pelo que neste capítulo são apresentados os dois ensaios realizados na empresa, bem como um ensaio estudado especificamente para auxiliar um dos já existentes.

Todos os ensaios realizados são destrutivos, podendo ou não ser *post mortem*, cabos retirados de serviço por motivos de monitorização ou de avaria são analisados e não voltam a ser colocados na rede.

O ensaio químico tem como principal objetivo detetar defeitos e/ou danos exclusivamente na isolação. No entanto é possível prever a condição da mesma tendo em conta o estado da blindagem metálica, figura 4.1, uma vez que uma blindagem oxidada é sinal de um ambiente extremamente húmido o que pode condicionar o bom funcionamento do cabo.

O ensaio físico ao contrário do químico permite avaliar a condição de todos os constituintes do cabo. No entanto, a isolação continua a em principal destaque.



Figura 4.1: Blindagem Metálica totalmente oxidada [CL]

4.1 Ensaios Químicos

Ao longo deste estudo foram realizados dois ensaios químicos diferentes, o primeiro utilizando a glicerina e o segundo, azul de metileno. Em ambos se examinaram pequenas secções da isolação das amostras, chamados de provetes, de modo a verificar a presença de defeitos ou danos nas mesmas. O segundo ensaio, realizado em menor numero, é um possível ensaio auxiliar a ser executado em amostras cujos resultados no primeiro ensaio não são conclusivos.

4.1.1 Ensaio com Glicerina

Este ensaio é realizado na empresa desde 2012, sendo o único ensaio específico realizado à isolação, e o seu procedimento está descrito, em maior pormenor, no anexo refann:gli.

A preparação desde ensaio é relativamente demorada, cerca de 30-45 minutos por amostra e inicia-se, tal como referido acima, com a seleção e o corte dos provetes a ser analisados.

A seleção do provete varia com o estado da isolação, uma vez que que em cabos com perfurações na isolação é necessário um provete extra, chamado C20, que corresponde à área envolvente à perfuração. Na figura 4.2 estão ilustrados os diferentes casos, em ambos é guardado um testemunho, T2, com cerca de 8-10 cm, com o intuito de salvaguardar alguma isolação para uma futura análise, se necessário.

O comprimento dos provetes pode variar entre 3 e 5 cm dependendo do comprimento total do cabo.

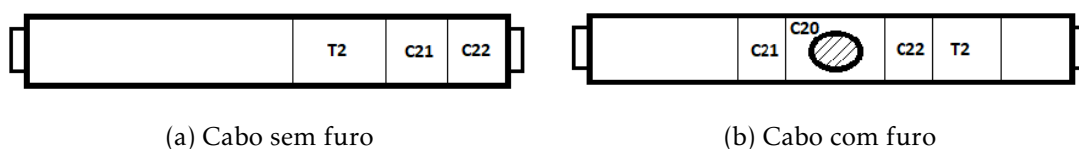
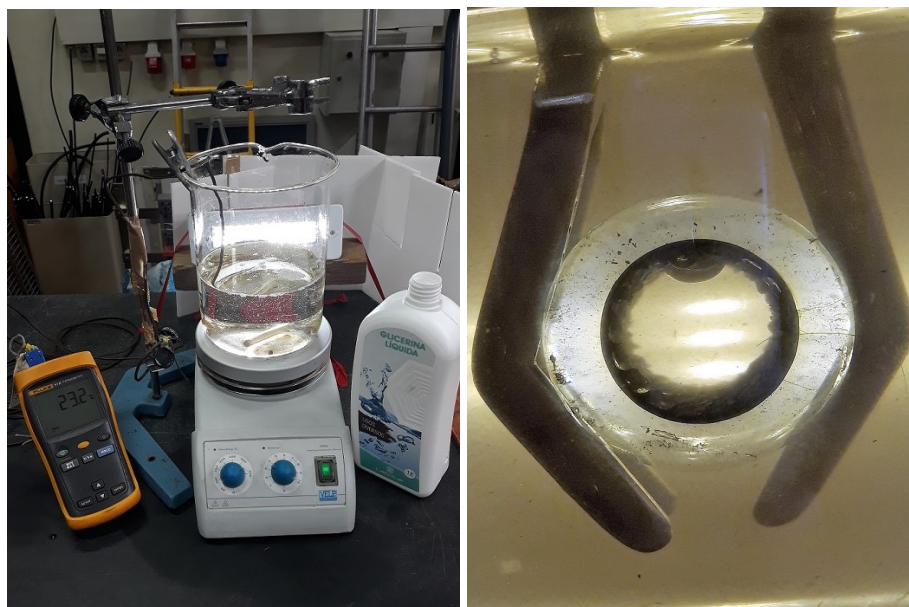


Figura 4.2: Preparação de Amostras para Ensaio com Glicerina

Após retirado o condutor e a blindagem, a isolação é limpa com acetona com o intuito de retirar quaisquer resíduos do semicondutor exterior, que tal como referido anteriormente, é aplicado por tripla extrusão. Após esta limpeza o provete é submergido numa solução de glicerina branca a 130°C durante 4-5 minutos até que se torne translucido, 4.3b. A montagem experimental está ilustrada na 4.3a.

No caso de existirem defeitos, independentemente do tipo, o proteve é fatiado com espessuras reduzidas, entre 0,5 a 5 mm. Após o corte as fatias são analisadas no projetor de perfis, dimensionando o defeito. É registado o maior comprimento e largura do defeito, independentemente de ser vacúolo ou arborescência. Cada fatia é numerada dando perceção de posição, externa ou interna, tendo em conta a dimensão e posição do provete, 4.4b.

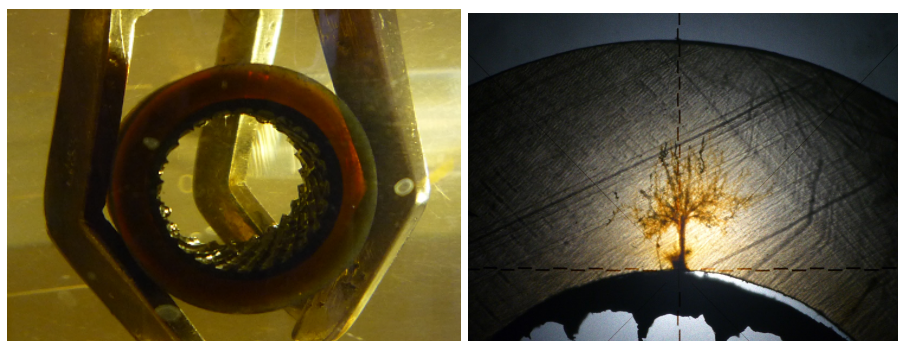


(a) Montagem do Ensaio

(b) Resultado pretendido

Figura 4.3: Ensaio com Glicerina, montagem e resultado [CL]

Comparando a figura 4.3b e a 4.4a é notável a diferente cor da isolamento, sendo esta a maior condicionante do ensaio. Apesar do material ser o mesmo, polietileno reticulado, o provete não fica translúcido o que dificulta a observação de defeitos.



(a) Resultado obtido

(b) Dimensionamento do Defeito-Corte em Fatias

Figura 4.4: Ensaio com Glicerina numa Amostra Semi-Opaca [CL]

A glicerina é trocada regularmente, pois assim que é inserido o primeiro provete a sua cor muda de translúcida para amarelada devido às impurezas nele existentes, quer sejam isolações brancas ou opacas.

4.1.2 Ensaio com Azul de Metileno

O ensaio com azul de metileno foi estudado com a finalidade de colmatar as falhas detetadas no método referido acima. O azul de metileno serve de contraste na presença de



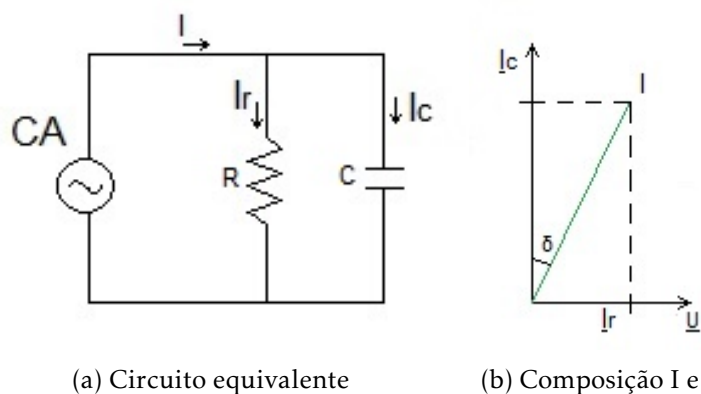
Figura 4.5: Exemplo de Ensaio com Azul de Metileno [17]

arborescências e os demais defeitos na isolação pelo que é um método a considerar.

A solução aquosa de azul metileno é relativamente simples de preparar, contendo 2 gramas de azul de metileno, 32 ml de amônia concentrada e 1 litro de água, conforme apresentada em [17]. A figura 4.5 é um exemplo do resultado pretendido.

4.2 Ensaio Físico

A nível elétrico o cabo é ensaiado através do analisador de resposta dielétrica Dirana, aparelho da Omicron, que juntamente com o seu software (Dirana 1.6) determina a resistência, capacidade, permitividade elétrica complexa do material dielétrico e através destes calcula a $\tan(\delta)$, figura 4.6, e fator de potência. Este último corresponde à razão entre a potência real e a potência total, e pode ser interpretado como o aproveitamento da potência fornecida. Estas medições são adquiridas recorrendo à espectroscopia no domínio da frequência (FDS em inglês) que corresponde à análise de um sinal após varrimento de uma gama de frequências.

Figura 4.6: Representação do circuito equivalente do cabo, representação de I e δ

Se o dielétrico fosse perfeito o circuito seria apenas representado por um condensador, C, no entanto existe sempre perdas por condução e dielétricas pelo que ao circuito é acrescentada uma resistência, R, em paralelo, tal como ilustrado na figura 4.6a. A isolação é então representada pela componente capacitiva, I_c , e pela componente resistiva, I_r , cujo

valor varia com os defeitos e envelhecimento do material, aumentando ou diminuindo o ângulo de perdas, δ . A corrente transversal, I , deixa de estar em quadratura com a tensão, U , passando a ter um avanço de $\frac{\pi}{2} - \delta$, tal como ilustrado na figura 4.6b.

A tangente do ângulo de perdas, $\tan(\delta)$, é adimensional e dada pela seguinte equação:

$$\tan(\delta) = \frac{I_r}{I_c} = \frac{1}{2\pi RCf} \quad (4.1)$$

No entanto em cabos já postos em serviço a $\tan(\delta)$ pode ser medida através da permissividade dielétrica complexa relativa, equação 4.2. O relacionamento entre ambas deve-se à relação existente entre o deslocamento elétrico e o campo elétrico, que estão desfasados.

A parte real da permissividade complexa relativa, é constante no limite estático, isto é, independente do tempo, enquanto que a parte imaginária é designada de índice de perdas dielétricas, por ter em conta as perdas devido à polarização do dielétrico. Neste caso δ é o ângulo entre o eixo real, ε_r' , e ε_r .

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)}, \omega = 2\pi f \quad (4.2)$$

Sendo a parte imaginária da permissividade complexa relativa proporcional à mesma parte da permissividade complexa absoluta, equações 4.3 e 4.4, no restante trabalho é utilizado o valor de ε'' para comparação de resultados.

Ambas as equações, 4.1 e 4.2, têm sido validadas experimentalmente e segundo a literatura [18, 19] tanto $\tan(\delta)$ como ε'' decrescem com o aumento da frequência, considerando o produto de $R \cdot C$ constante, sendo esse o resultado expectável em cabos anteriormente utilizados.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j\varepsilon_r'' \quad (4.3)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_r'' \cdot \varepsilon_0 \quad (4.4)$$

Em cabos novos o comportamento esperado é diferente, tal como ilustrado na figura 4.7, esta diferença prende-se essencialmente com a condição dos materiais constituintes do cabo que sofrem deterioramento das suas características elétricas assim que são postos em serviço.

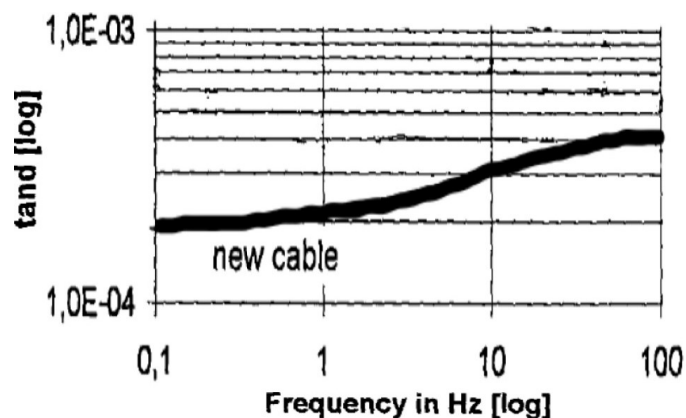


Figura 4.7: Curva $\tan(\delta)$ vs Frequência, para um Cabo Novo com 6 m, adaptado de [18]

Na figura 4.8 está o aparelho utilizado, Dirana, onde o Output 1 é aplicado na blindagem metálica do cabo e o CH1 lê a corrente na alma condutora, sendo o esquema apresentado na figura 4.9.



Figura 4.8: Aparelho utilizado: Dirana

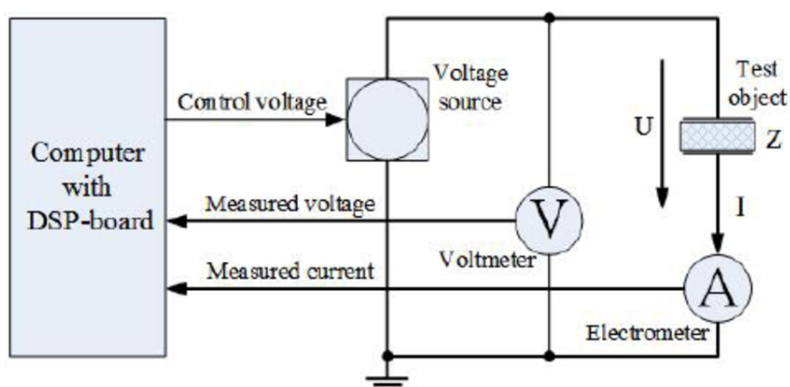


Figura 4.9: Esquema de ligações para Ensaio Físico [20]

O aparelho Dirana é então utilizado para aplicar o sinal e adquirir os dados resultantes dessa aplicação. Os dados adquiridos são tratados com o software Dirana 1.6, que têm tabelados os seguintes valores de exatidão:

Tabela 4.1: Exatidão do software Dirana 1.6

Parâmetro	Intervalo	Exatidão
$\tan(\delta)$	$1 \text{ mHz} < f < 100 \text{ Hz}$	$1\% + 3 \cdot 10^{-4}$
	$f < \text{mHz e } f > 100 \text{ Hz}$	$2\% + 5 \cdot 10^{-4}$
Capacidade	$10 \text{ pF} < C \mu\text{F} < 100$	$0.5\% + 1 \text{ pF}$

Este ensaio depende tanto da condição da isolação como da blindagem uma vez que uma blindagem oxidada vai resultar numa queda de tensão que pode ser significativa. No entanto não são apenas os fatores internos do cabo que interferem com o resultado do ensaio, uma vez que a temperatura, a humidade e o tamanho da amostra são aspetos a ter em consideração.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo destina-se à apresentação e discussão dos dados adquiridos ao longo deste estudo, tanto a nível de ensaio químico como elétrico. Os resultados serão ainda comparados com alguns dados previamente adquiridos na empresa.

5.1 Ensaio com Glicerina

O ensaio da glicerina é um ensaio padrão que permite bons resultados, figura 5.1, no entanto como são analisadas pequenas secções do cabo, comparativamente ao seu todo, não garante totalmente a perfeita condição do mesmo.

Ao analisar dados recolhidos anteriormente observou-se que os cabos perfurados têm maior probabilidade de terem problemas, mesmo que não sejam detetados neste ensaio.



Figura 5.1: Exemplo de Arborescência Elétrica

5.2 Ensaio com Azul de Metileno

Contrariamente ao ensaio da glicerina, que pode ser realizado utilizando provetes de dimensões consideráveis, este ensaio auxiliar só pode ser realizado após o corte em finas fatias. Tal como visível abaixo, na figura 5.2, o azul de metileno tem dificuldades em penetrar no provete quando este tem dimensões superiores a 3-4 mm.

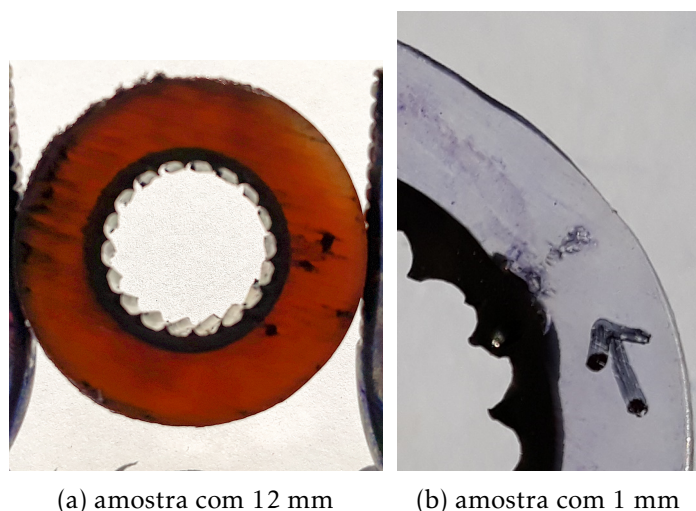


Figura 5.2: Diferenciação de espessuras nas amostras

O tempo de permanência das fatias na solução foi alterado consoante a espessura da fatia, sendo indicado 4 horas para uma fatia de 0,1 mm, havendo amostras a permanecer 24 horas para existir uma coloração visível do material.

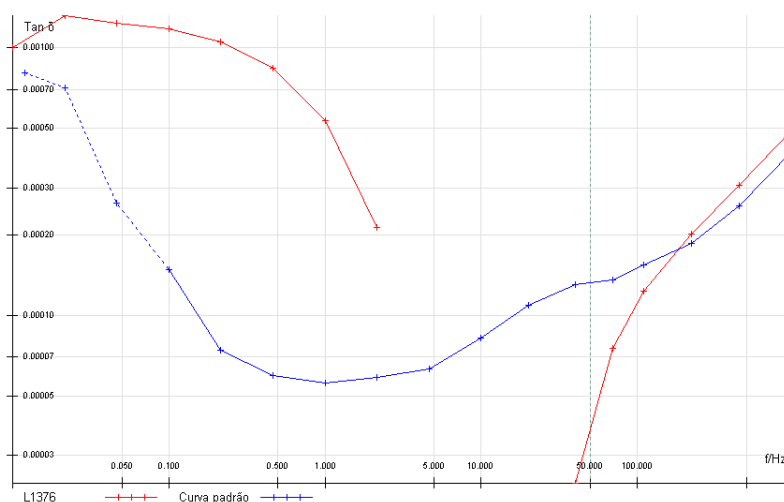
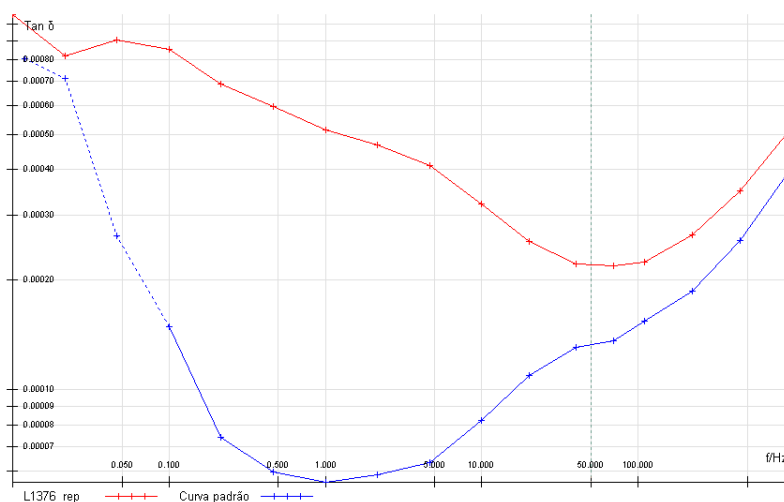
Todos os ensaios realizados a fatias de baixa espessura, inferiores a 3 mm, foram positivos, havendo bom contraste aquando existência de arborescências ou outros contaminantes pelo que se confirma a utilidade nestas condições, figura 5.2b.

Contudo, sendo o processo para fatiar as amostras demorado sugere-se ser realizado apenas em amostras opacas de modo a determinar a existência de problemas na isolamento.

5.3 Ensaio Físico

De modo a contornar os efeitos ambientais no ensaio, este é realizado num espaço isolado com controlo de temperatura, 25°C é considerada a temperatura ideal, e todas as amostras ali permanecem pelo menos 24 horas.

A tensão utilizada foi 100 V, valor máximo que o aparelho atinge, numa banda de frequência entre os 10 mHz e 1 kHz, pois abrange as frequências consideradas padrão na Labelec: 100 mHz e 50 Hz. Estes valores são assim considerados devido a questões operacionais na realização de ensaios em campo. De forma a comparar os resultados de laboratório com os de campo, usa-se as mesmas frequências padrão.

(a) Amostra com 20 cm, modo *Standard*(b) Amostra com 20 cm, modo *Improved*Figura 5.3: Comparação modo *Standard* vs *Improved* [CL]

As medições foram realizadas utilizando o modo *Improved*, que apesar de demorar mais tempo a adquirir os dados do que no modo *Standard*, usualmente utilizado, resulta numa aquisição mais precisa pois elimina melhor o ruído existente. Na figura 5.3 observa-se isso mesmo, uma vez que a análise da mesma amostra utilizando o modo *Standard* resulta numa curva com um intervalo de valores negativos (linha vermelha), entre os 2 e 50 Hz, que não são possíveis de apresentar em escala logarítmica, ao contrário da curva adquirida por modo *Improved*. A azul é representada a curva até agora considerada padrão, isto é, a curva com a qual se comparam os valores de $\tan(\delta)$.

Para otimização deste ensaio foram testados 3 cabos novos com vários comprimentos, alterando o fabricante e o valor de tensão suportada. De modo a facilitar a percepção dos resultados obtidos as várias amostras estão identificadas na tabela 5.1, onde o cabo A1 têm 3 comprimentos diferentes, o cabo A2 têm 8 comprimentos diferenciados em 10 cm

cada, ($\Delta = 10$), e o cabo D1 têm 5 comprimentos decrescendo 20 cm entre cada dimensão estudada, ($\Delta = 20$).

Tabela 5.1: Identificação das amostras

Fabricante	Tensão[kV]	Identificação	Comprimento[cm]
A	8.7/15	A1	100/30/15
		A2	100-20 ($\Delta = 10$)
D	8.7/15	D1	100-20 ($\Delta = 20$)

Uma vez que o cabo A1 já tinha sido cortado previamente a este estudo não houve possibilidade de ter mais valores de comprimento, no entanto as dimensões das amostras A2 e D1 foram escolhidas tendo em conta as dimensões das amostras anteriormente analisadas pela empresa. Uma vez que existem mais cabos analisados de tensão 6/10, o cabo A2 têm maior numero de amostras.

Os dados utilizados para construção dos gráficos seguintes encontram-se no apêndice A e todos os valores de $\tan(\delta)$ e ε'' têm um erro de 10^{-5} , $F * m^{-1}$ no caso da permitividade. A frequência tem um erro associado de $10 \mu\text{Hz}$. Estes valores de erro são dados pelo manual de especificações do aparelho e uma vez que se desconhece a incerteza associada ao método de cálculo dos parâmetros, assumem-se como corretos.

5.3.1 Amostra A1

A amostra A1 é de 2016, têm a designação "RHV-OL 8.7/15 (17.5) XLPE 240 AL" o que significa que a alma condutora é de alumínio, 240mm^2 , a isolação é XLPE, tem a bainha externa de PVC e proteção mecânica com fitas hidroexpansivas. A tensão 8.7 kV corresponde à diferença fase-terra, os 15 kV são correspondentes à diferença entre fases e o 17.5 kV o máximo valor entre fases.

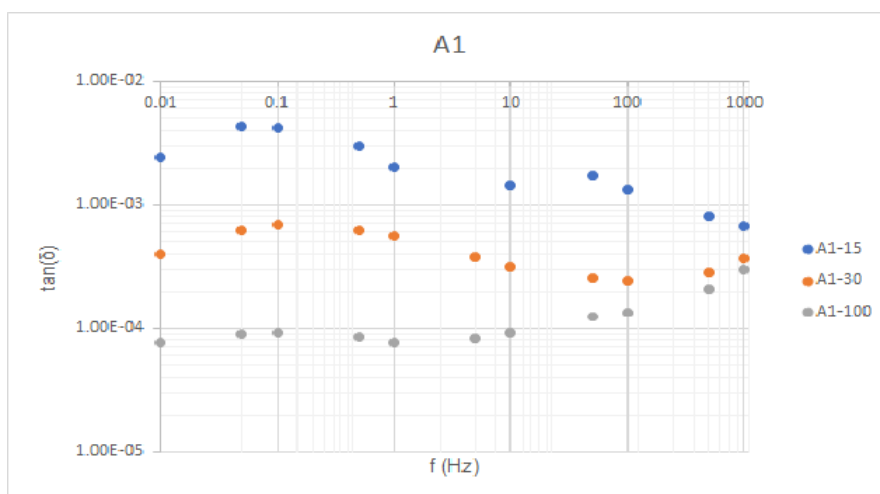
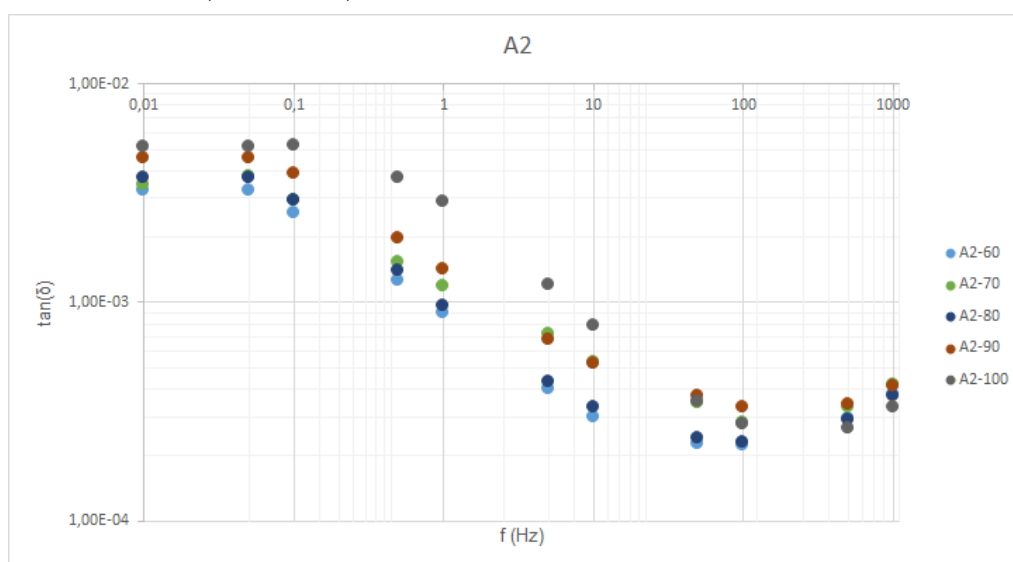


Figura 5.4: Efeito da diminuição do comprimento, amostra A1

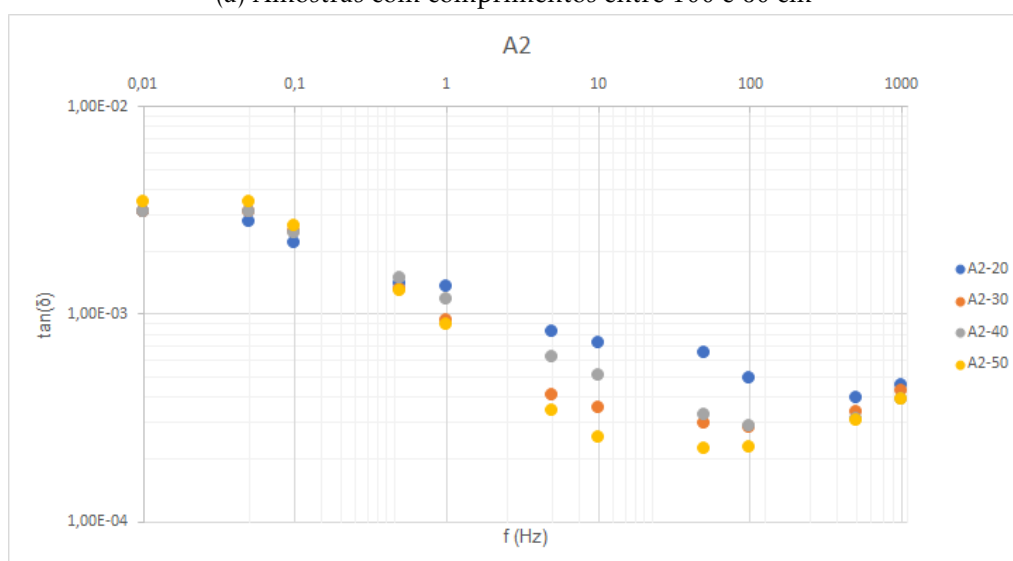
Na figura 5.4 verifica-se uma diferença significativa nos valores de $\tan(\delta)$ com o decréscimo do comprimento, sendo que a curva A1-100 e A1-15 têm valores de ordens de grandeza diferentes a frequências mais baixas, no entanto o seu comportamento assemelha-se ao comportamento de um cabo novo revisto na literatura.

5.3.2 Amostra A2

A amostra A2 é de 2018, têm a designação "LXHIOZ1 240/16 6/10 (12) 2018" o que pela norma portuguesa significa que a alma condutora é de alumínio, 240mm^2 , a isolamento é XLPE, tem um ecrã metálico individual (fita) e fios de cobre, 16mm^2 , a bainha externa é de poliolefina (Z1). Tal como na amostra A1, os valores 6/10 (12) correspondem respetivamente aos valores, terra-fase, fase-fase e máxima tensão admissível.



(a) Amostras com comprimentos entre 100 e 60 cm



(b) Amostras com comprimentos entre 50 e 20 cm

Figura 5.5: Efeito da diminuição do comprimento, Amostra A2

Na figura 5.5 verifica-se que a curva segue um declínio com o aumento da frequência, se considerarmos o valor RC constante é possível considerar que está de acordo com a teoria, equação 4.1.

Sendo as amostras A1 e A2 do mesmo fabricante seria de esperar um comportamento idêntico, uma diminuição de comprimento revelar um aumento de ε'' , contudo isso não se verifica, uma vez que diferentes comprimentos da amostra A2 revelam valores aproximados.

Contudo ao comparar os comprimentos semelhantes, figura 5.6, podemos observar que as amostras que suportam maior tensão, A1, têm valores de $\tan(\delta)$ menores mas a diminuição do comprimento aproxima esses valores com os da amostra A2.

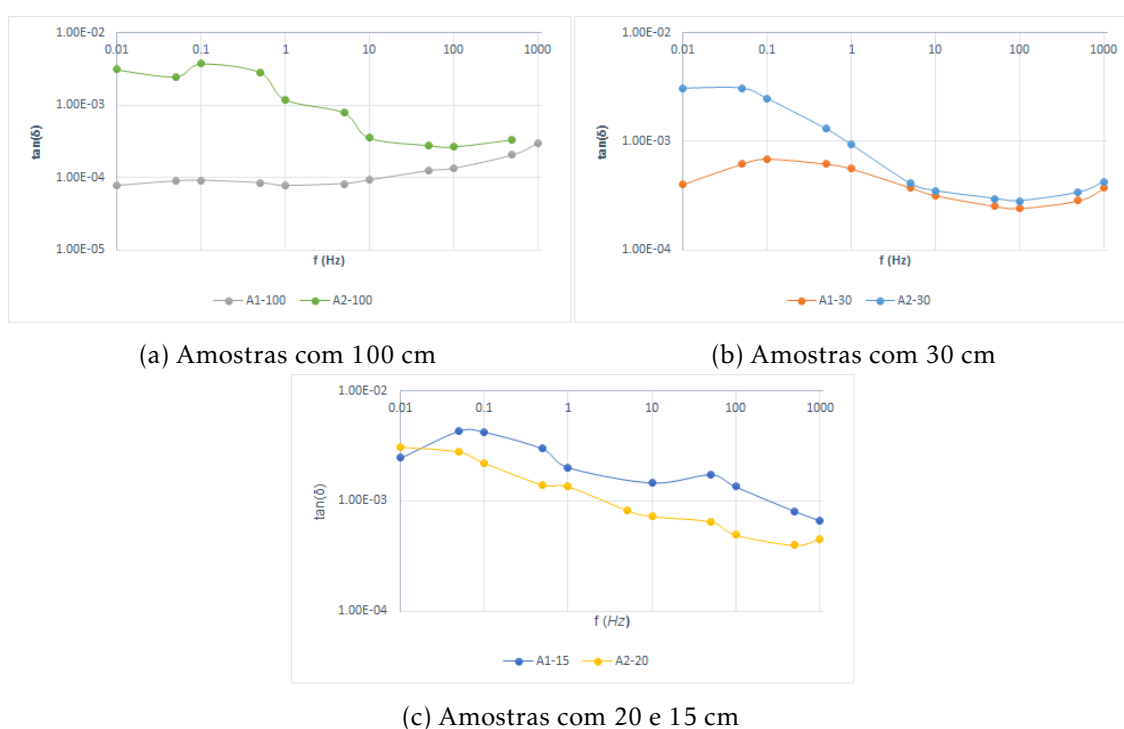


Figura 5.6: Gráficos de comparação das amostras A1 e A2

Ao comparar os gráficos apresentados nas figuras 5.6a e 5.6b é visível a tendência dos valores se aproximarem após a diminuição do comprimento da amostra A1. Tendo isto em conta, torna-se necessária uma atualização na base de dados da empresa, uma vez que não é coerente utilizar apenas um valor de $\tan(\delta)$ para comparar amostras com comprimentos diferentes.

5.3.3 Amostra D1

A amostra D1 é de 2016, têm a designação "LXHIOZ1 240/168.7/15 2016"o que pela norma portuguesa significa que a alma condutora é de alumio, $240mm^2$, a isolamento é

XLPE, tem um ecrã metálico individual (fita) e fios de cobre, 16mm^2 , a bainha externa é de poliolefina. Tal como a amostra A1, suporta até 17.5 kV.

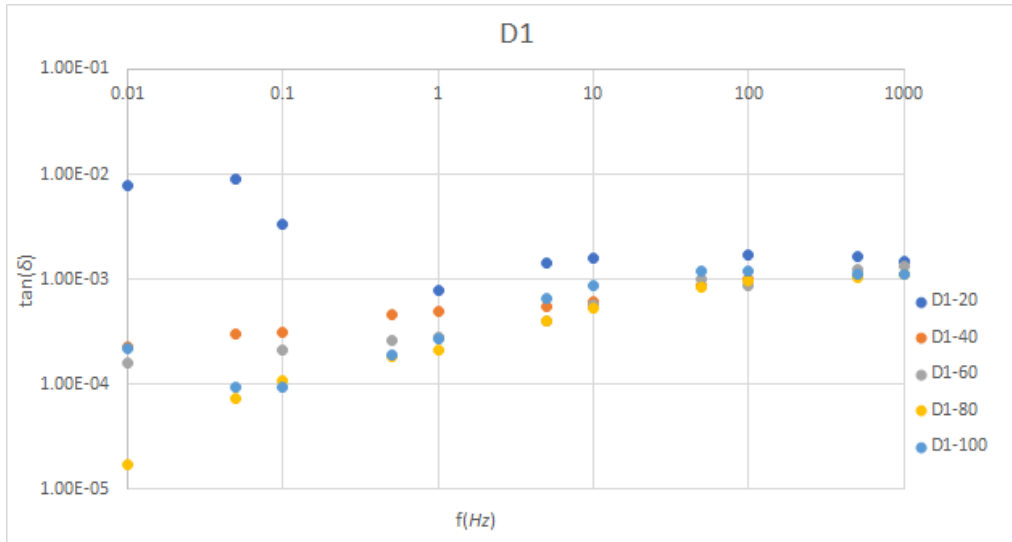
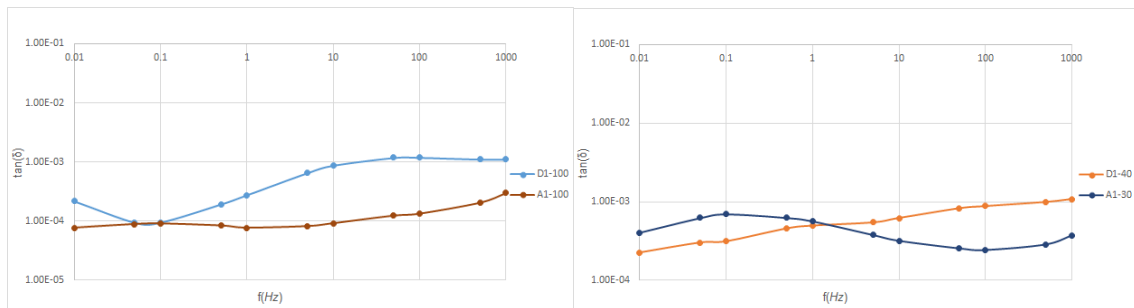


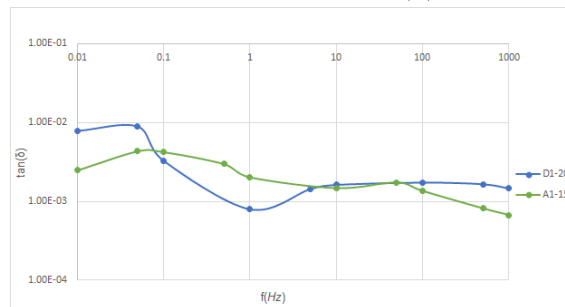
Figura 5.7: Efeito da diminuição do comprimento, amostra D1

O comportamento desta amostra é semelhante ao da amostra A1, uma vez que é visível o efeito da diminuição de comprimento nos valores de $\tan(\delta)$, figura 5.7.



(a) Amostras com 100 cm

(b) Amostras com 30 e 40 cm



(c) Amostras com 15 e 20 cm

Figura 5.8: Gráficos de comparação amostras A1 e D1

Mais uma vez a diminuição do comprimentos faz aumentar o valor de ϵ'' , figura 5.8. Tal como esperado a ordem de grandeza das amostras A1 e D1 são semelhantes uma vez

que suportam o mesmo nível de tensão, no entanto, como podemos ver na figura 5.8a para frequências mais altas os valores começam a afastar-se.

Em ambos os cabos de 8.7/15 kV, ilustrados na figura 5.8c, foram detetados valores negativos. Após utilizar o seu valor absoluto foi necessário ignorar alguns valores de $\tan(\delta)$ uma vez que surgiam pontos angulosos desta conversão.

Estes valores negativos a baixas frequências podem acontecer frequentemente em cabos e transformadores novos, cuja isolamento apresenta uma corrente resistiva tão baixa que a corrente detetada se encontra na ordem dos μA . Este baixo valor de corrente, juntamente com a pequena dimensão das amostras faz com que o ensaio a baixas frequências seja inconclusivo.

5.3.4 Comparação entre Amostras

Os valores de frequência com maior foco aquando a análise dos testes são 100 mHz e 50 Hz, de forma a comparar os dados adquiridos em campo e no laboratório. Cada amostra foi analisada 3 vezes de forma a ter um resultado mais fidedigno havendo comprimentos diferentes para cada uma delas. Os valores apresentados são a média dos 3 ensaios.

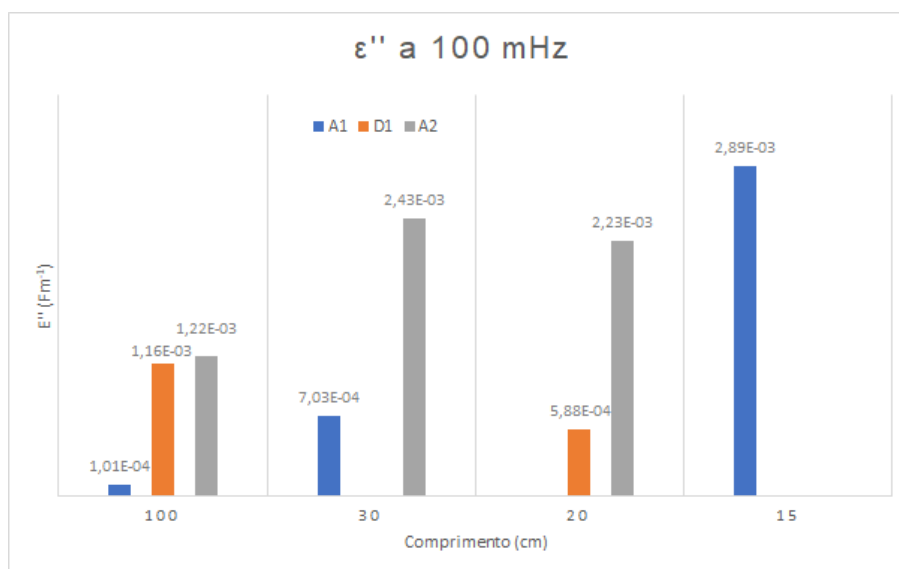
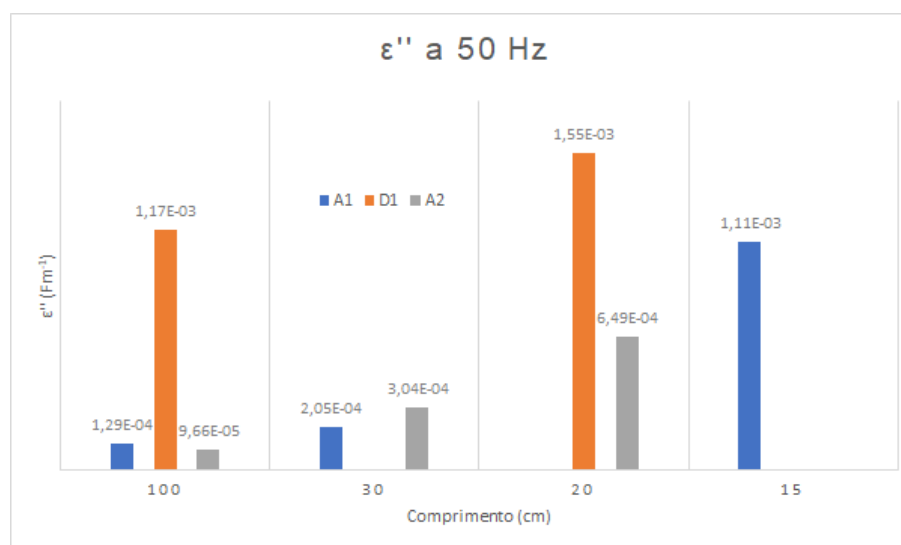


Figura 5.9: Comparação ε'' a 100 mHz

Ao compararmos as figuras 5.9 e 5.10 com o efeito do comprimento na $\tan(\delta)$ confirma-se a relação existente entre a mesma e ε'' . Relevante é também a proximidade dos valores nas amostras A1 e A2, com o aumento da frequência especialmente com a diminuição do comprimento, que pode significar uma relação direta entre o fabricante e a ordem de grandeza de ε'' .

Figura 5.10: Comparação ϵ'' a 50 Hz

5.4 Comparação com Amostras já Analisadas pela Empresa

Após análise dos resultados experimentais, reavaliou-se os dados anteriormente obtidos pela empresa.

Dos 132 cabos previamente analisados, apenas 95 são considerados nas tabelas abaixo pois 34 são de fabricante desconhecido e 3 são de um quinto fabricante.

Tabela 5.2: Média de valores a 100 mHz

Fabricante	$\tan(\delta)$	RC[s]	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$
A	$4.14 * 10^{-03}$	$1.73 * 10^{+03}$	$2.07 * 10^{+00}$
B	$7.95 * 10^{-04}$	$3.86 * 10^{+03}$	$1.49 * 10^{-03}$
C	$7.09 * 10^{-03}$	$1.70 * 10^{+03}$	$2.56 * 10^{-02}$
D	$4.53 * 10^{-02}$	$9.94 * 10^{+02}$	$4.78 * 10^{-02}$

Tabela 5.3: Média de valores obtidos a 50 Hz

Fabricante	$\tan(\delta)$	RC [ms]	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$
A	$9.96 * 10^{-03}$	$1.14 * 10^{+04}$	$5.38 * 10^{-02}$
B	$2.93 * 10^{-04}$	$1.34 * 10^{+04}$	$5.06 * 10^{-04}$
C	$1.77 * 10^{-02}$	$4.50 * 10^{+03}$	$7.80 * 10^{-02}$
D	$3.99 * 10^{-03}$	$3.52 * 10^{+03}$	$4.05 * 10^{-03}$

Na tabela 5.2 é relevante notar que cada fabricante tem um valor de ϵ'' respetivo, tendo apenas 2 deles valores na mesma grandeza. Contudo nesta breve reavaliação não se separou as amostras por comprimentos, o que iria alterar os resultados nos comprimentos mais pequenos, tal como visto na secção anterior.

Ao comparar as tabelas 5.2 e 5.4, é visível a diferença nos valores da $\tan(\delta)$ e ϵ'' , tal como esperado.

Tabela 5.4: Média de valores obtidos a 100 mHz, excluindo amostras com problemas detetados na isolação

Fabricante	$\tan(\delta)$	RC[s]	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$
A	$6.67 * 10^{-03}$	$1.04 * 10^{+03}$	$2.75 * 10^{-00}$
B	$6.45 * 10^{-04}$	$4.35 * 10^{+03}$	$6.46 * 10^{-04}$
C	$7.19 * 10^{-03}$	$1.77 * 10^{+03}$	$2.66 * 10^{-02}$
D	$5.71 * 10^{-02}$	$1.10 * 10^{+03}$	$6.02 * 10^{-02}$

Tabela 5.5: Média de valores obtidos a 50 Hz, excluindo amostras com problemas detetados na isolação

Fabricante	$\tan(\delta)$	RC [ms]	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$
A	$1.15 * 10^{-02}$	$7.18 * 10^{+03}$	$1.24 * 10^{-02}$
B	$2.83 * 10^{-04}$	$1.35 * 10^{+04}$	$5.35 * 10^{-04}$
C	$1.84 * 10^{-02}$	$4.67 * 10^{+03}$	$8.18 * 10^{-02}$
D	$4.17 * 10^{-03}$	$4.06 * 10^{+03}$	$4.24 * 10^{-03}$

Conjugando os resultados do ensaio da glicerina e do FDS, é de realçar a existência de vacúolos e arborescências na maioria dos cabos cujo valor de RC é superior a $19 * 10^{+03}s$ e que dessa maioria mais de 50% têm perfuração, corroborando com a afirmação dada na secção 5.1, de que um ensaio não é suficiente para garantir o estado de condição do cabo.

CONCLUSÕES

Após o estudo realizado é evidente que um maior controlo sob a temperatura e humidade seria benéfico para a realização dos ensaios, assim como definir o limite mínimo de comprimento das amostras para não haver situações com valores de $\tan(\delta)$ e ε'' negativos, uma vez que o aparelho não se encontra dimensionado para comprimentos desta ordem de grandeza (cm).

A utilização do modo *Improved* traduz-se numa melhoria significativa do sinal analisado, pelo que compensa o tempo adicional ao ensaio, cerca de uma hora.

Tendo sido relevante a relação descoberta entre o fabricante e a permitividade complexa, é necessário rever o método de avaliação da condição dos cabos, uma vez que não se deve ter em conta apenas um valor teórico mas sim um valor para cada fabricante, tendo ainda em consideração o tamanho da amostra.

A criação de uma base de dados contendo valores de permitividade e $\tan(\delta)$ em função dos diferentes fabricantes, valores de tensão e comprimentos de cabos será benéfica a curto prazo, uma vez que garante uma melhor prestação de serviço por parte da empresa, e a longo prazo sendo possível identificar amostras cujos dados (fabricante ou valor de tensão) não sejam conhecidos.

Terminado este estudo, sugere-se a continuação da análise dos diferentes fabricantes que não foram abordados, com a finalidade da criação de uma base de dados. Poderá também ser conveniente efetuarem-se no âmbito da química estudos à isolação, tendo em vista uma melhor compreensão da alteração da sua cor uma vez que não interfere com as propriedades elétricas do material.

BIBLIOGRAFIA

- [1] H. Orton. "History of underground power cables". Em: *IEEE Electrical Insulation Magazine* 29.4 (2013), pp. 52–57. DOI: 10.1109/mei.2013.6545260.
- [2] G. C. Brasil. *Catálogo - cabos de média tensão*.
- [3] S. Nilsson, T. Hjertberg e A. Smedberg. "The effect of different type of crosslinks on electrical properties in crosslinked polyethylene". Em: *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, 2010. DOI: 10.1109/icstd.2010.5568237.
- [4] E. Csanyi. *Characteristics of XLPE insulated cables*. Rel. téc. EEP - Electrical Engineering Portal, 2014.
- [5] J. A. Wahab, N. S. Mansor, D. Ishak, M. Kamarol, M. Mariatti, A. B. A. Ghani e H. S. Halim. "Investigation of water tree characteristic in XLPE nanocomposites for medium voltage cable application". Em: *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*. IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ichveps.2017.8225865.
- [6] S. S. Sengupta, T. J. Person e P. J. Caronia. "A new generation of tree-retardant crosslinked polyethylene (TR-XLPE) insulation". Em: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, jun. de 2010. DOI: 10.1109/elinsl.2010.5549560.
- [7] J. Parmar. "Cable construction & cable selection". Em: *Electrical Notes & Articles* (2016).
- [8] R. Calçarao. "SEMICOND - consequências da falta total ou parcial do semicondutor interior, para cabos de MT e AT". Tese de mestrado. FEUP, 2013.
- [9] J. N. dos Santos. *Cabos e condutores de energia*. FEUP, 2005.
- [10] S. Nordas e E. Ildstad. "The influence of strain on water treeing in XLPE power cables". Em: *2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics*. IEEE, 2010. DOI: 10.1109/icstd.2010.5568215.
- [11] E. F. S. N. van Schaik. *KEMA COURSE POWER CABLES*. KEMA, 2005.
- [12] NEETRAC. *Diagnostic testing of underground cable systems*. Rel. téc. Georgia Tech Research Corporation, 2010.

- [13] E. F. Steennis. "WATER TREEING : the behaviour of water trees in extruded cable insulation". Tese de doutoramento. Electrical Engineering, Mathematics e Computer Science - TU Delft, 1989.
- [14] K. Zhou, M. Huang, W. Tao, M. He e M. Yang. "A possible water tree initiation mechanism for service-aged XLPE cables: conversion of electrical tree to water tree". Em: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 23.3 (2016), pp. 1854–1861. DOI: 10.1109/tdei.2016.005405.
- [15] Q. Chen, E. Makram e X. Xu. "A hybrid high frequency pulse and pattern recognition method for water tree detection in long distance underground cables". Em: *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. IEEE, 2015. DOI: 10.1109/pesgm.2015.7286628.
- [16] J. Zeng, J. Song, Z. Lei, L. Lin, M. Tian e Y. Li. "Partial discharge properties of electrical trees in XLPE". Em: *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/cmd.2016.7758009.
- [17] B. N. Bressan. "Desenvolvimento de sistema e metodologia para avaliar a influência da temperatura em medidas de tensão de retorno em cabos isolados em XLPE". Tese de mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2006.
- [18] A. Avellan, P. Werelius e R. Eriksson. "Frequency domain response of medium voltage XLPE cable terminations and its influence on cable diagnostics". Em: *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)*. IEEE, 2000. DOI: 10.1109/elinsl.2000.845457.
- [19] C. Dartora, H. Armando, F. Thomazi e E. Burkarter. "Caracterização experimental da permissividade dielétrica de materiais através da técnica de refletometria no domínio do tempo". Em: *Revista Brasileira de Ensino de Física* 37.1 (2015), p. 1315. DOI: 10.1590/s1806-11173711712.
- [20] M. Dong, M. Ren, F. Wen, C. Zhang, J. Liu, C. Sumereder e M. Muhr. "Explanation and analysis of oil-paper insulation based on frequency-domain dielectric spectroscopy". Em: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 22.5 (2015), pp. 2684–2693. DOI: 10.1109/tdei.2015.005156.
- [21] Cabelte. *Cabos de energia - média tensão*. 2000.



APÊNDICE 1 - DADOS EXPERIMENTAIS

Tabela A.1: Valores de ϵ'' e $\tan(\delta)$ a 10 mHz

A2		A1		D1		C[cm]
$\tan(\delta)$	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$	
		$-2.47 \cdot 10^{-03}$	$-2.48 \cdot 10^{-03}$			15
$3.11 \cdot 10^{-03}$	$3.12 \cdot 10^{-03}$			$-7.84 \cdot 10^{-03}$	$-7.78 \cdot 10^{-03}$	20
$3.11 \cdot 10^{-03}$	$3.12 \cdot 10^{-03}$	$4.04 \cdot 10^{-04}$	$4.04 \cdot 10^{-04}$			30
$3.09 \cdot 10^{-03}$	$3.10 \cdot 10^{-03}$			$2.26 \cdot 10^{-04}$	$2.27 \cdot 10^{-04}$	40
$3.45 \cdot 10^{-03}$	$3.46 \cdot 10^{-03}$					50
$3.27 \cdot 10^{-03}$	$3.28 \cdot 10^{-03}$			$-1.61 \cdot 10^{-04}$	$-1.61 \cdot 10^{-04}$	60
$3.45 \cdot 10^{-03}$	$3.46 \cdot 10^{-03}$					70
$3.73 \cdot 10^{-03}$	$3.75 \cdot 10^{-03}$			$1.70 \cdot 10^{-05}$	$1.69 \cdot 10^{-05}$	80
$4.60 \cdot 10^{-03}$	$4.63 \cdot 10^{-03}$					90
$5.18 \cdot 10^{-03}$	$5.24 \cdot 10^{-03}$	$7.70 \cdot 10^{-05}$	$7.74 \cdot 10^{-05}$	$2.16 \cdot 10^{-04}$	$2.21 \cdot 10^{-04}$	100

Tabela A.2: Valores de ϵ'' e $\tan(\delta)$ a 50 mHz

A2		A1		D1		C[cm]
$\tan(\delta)$	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\epsilon'' [Fm^{-1}]$	
		$-4.34 \cdot 10^{-03}$	$-4.36 \cdot 10^{-03}$			15
$2.80 \cdot 10^{-03}$	$2.82 \cdot 10^{-03}$			$-8.95 \cdot 10^{-03}$	$-8.95 \cdot 10^{-03}$	20
$3.11 \cdot 10^{-03}$	$3.12 \cdot 10^{-03}$	$6.21 \cdot 10^{-04}$	$6.22 \cdot 10^{-04}$			30
$3.09 \cdot 10^{-03}$	$3.10 \cdot 10^{-03}$			$3.03 \cdot 10^{-04}$	$3.04 \cdot 10^{-04}$	40
$3.45 \cdot 10^{-03}$	$3.46 \cdot 10^{-03}$					50
$3.27 \cdot 10^{-03}$	$3.28 \cdot 10^{-03}$			$-1.80 \cdot 10^{-05}$	$-1.82 \cdot 10^{-05}$	60
$3.74 \cdot 10^{-03}$	$3.76 \cdot 10^{-03}$					70
$3.73 \cdot 10^{-03}$	$3.75 \cdot 10^{-03}$			$7.40 \cdot 10^{-05}$	$7.44 \cdot 10^{-05}$	80
$4.60 \cdot 10^{-03}$	$4.63 \cdot 10^{-03}$					90
$5.18 \cdot 10^{-03}$	$5.24 \cdot 10^{-03}$	$8.90 \cdot 10^{-05}$	$8.93 \cdot 10^{-05}$	$9.30 \cdot 10^{-05}$	$9.33 \cdot 10^{-05}$	100

Tabela A.3: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 100 mHz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		-4.24*10 ⁻⁰³	-4.25*10 ⁻⁰³			15
2.22*10 ⁻⁰³	2.23*10 ⁻⁰³			-3.29*10 ⁻⁰³	-3.30*10 ⁻⁰³	20
2.49*10 ⁻⁰³	2.49*10 ⁻⁰³	6.94*10 ⁻⁰⁴	6.95*10 ⁻⁰⁴			30
2.47*10 ⁻⁰³	2.48*10 ⁻⁰³			3.14*10 ⁻⁰⁴	3.15*10 ⁻⁰⁴	40
2.67*10 ⁻⁰³	2.67*10 ⁻⁰³					50
2.55*10 ⁻⁰³	2.55*10 ⁻⁰³			2.09*10 ⁻⁰⁴	2.10*10 ⁻⁰⁴	60
2.93*10 ⁻⁰³	2.94*10 ⁻⁰³					70
2.92*10 ⁻⁰³	2.93*10 ⁻⁰³			1.07*10 ⁻⁰⁴	1.07*10 ⁻⁰⁴	80
3.86*10 ⁻⁰³	3.88*10 ⁻⁰³					90
5.20*10 ⁻⁰³	5.25*10 ⁻⁰³	9.10*10 ⁻⁰⁵	9.14*10 ⁻⁰⁵	9.30*10 ⁻⁰⁵	9.33*10 ⁻⁰⁵	100

Tabela A.4: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 500 mHz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		-2.99*10 ⁻⁰³	-3.00*10 ⁻⁰³			15
1.40*10 ⁻⁰³	1.41*10 ⁻⁰³			-1.70*10 ⁻⁰⁵	-1.76*10 ⁻⁰⁵	20
1.31*10 ⁻⁰³	1.31*10 ⁻⁰³	6.24*10 ⁻⁰⁴	6.25*10 ⁻⁰⁴			30
1.48*10 ⁻⁰³	1.48*10 ⁻⁰³			4.57*10 ⁻⁰⁴	4.58*10 ⁻⁰⁴	40
1.30*10 ⁻⁰³	1.30*10 ⁻⁰³					50
1.26*10 ⁻⁰³	1.26*10 ⁻⁰³			2.61*10 ⁻⁰⁴	2.62*10 ⁻⁰⁴	60
1.52*10 ⁻⁰³	1.52*10 ⁻⁰³					70
1.40*10 ⁻⁰³	1.40*10 ⁻⁰³			1.82*10 ⁻⁰⁴	1.82*10 ⁻⁰⁴	80
1.98*10 ⁻⁰³	1.98*10 ⁻⁰³					90
3.74*10 ⁻⁰³	3.75*10 ⁻⁰³	8.40*10 ⁻⁰⁵	8.44*10 ⁻⁰⁵	1.90*10 ⁻⁰⁴	1.91*10 ⁻⁰⁴	100

Tabela A.5: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ a 1 Hz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		-2.03*10 ⁻⁰³	-2.04*10 ⁻⁰³			15
1.35*10 ⁻⁰³	1.36*10 ⁻⁰³			7.91*10 ⁻⁰⁴	7.96*10 ⁻⁰⁴	20
9.32*10 ⁻⁰⁴	9.33*10 ⁻⁰⁴	5.64*10 ⁻⁰⁴	5.65*10 ⁻⁰⁴			30
1.18*10 ⁻⁰³	1.18*10 ⁻⁰³			4.96*10 ⁻⁰⁴	4.97*10 ⁻⁰⁴	40
8.93*10 ⁻⁰⁴	8.94*10 ⁻⁰⁴					50
9.01*10 ⁻⁰⁴	9.02*10 ⁻⁰⁴			2.77*10 ⁻⁰⁴	2.78*10 ⁻⁰⁴	60
1.18*10 ⁻⁰³	1.18*10 ⁻⁰³					70
9.68*10 ⁻⁰⁴	9.69*10 ⁻⁰⁴			2.11*10 ⁻⁰⁴	2.12*10 ⁻⁰⁴	80
1.42*10 ⁻⁰³	1.42*10 ⁻⁰³					90
2.87*10 ⁻⁰³	2.87*10 ⁻⁰³	7.70*10 ⁻⁰⁵	7.67*10 ⁻⁰⁵	2.73*10 ⁻⁰⁴	2.74*10 ⁻⁰⁴	100

Tabela A.6: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 5 Hz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		7.04*10 ⁻⁰⁴	7.08*10 ⁻⁰⁴			15
8.25*10 ⁻⁰⁴	8.26*10 ⁻⁰⁴			1.43*10 ⁻⁰³	1.44*10 ⁻⁰³	20
4.09*10 ⁻⁰⁴	4.10*10 ⁻⁰⁴	3.78*10 ⁻⁰⁴	3.79*10 ⁻⁰⁴			30
6.23*10 ⁻⁰⁴	6.24*10 ⁻⁰⁴			5.45*10 ⁻⁰⁴	5.47*10 ⁻⁰⁴	40
3.42*10 ⁻⁰⁴	3.43*10 ⁻⁰⁴					50
4.01*10 ⁻⁰⁴	4.02*10 ⁻⁰⁴			4.04*10 ⁻⁰⁴	4.06*10 ⁻⁰⁴	60
7.12*10 ⁻⁰⁴	7.12*10 ⁻⁰⁴					70
4.32*10 ⁻⁰⁴	4.33*10 ⁻⁰⁴			3.94*10 ⁻⁰⁴	3.95*10 ⁻⁰⁴	80
6.72*10 ⁻⁰⁴	6.73*10 ⁻⁰⁴					90
1.20*10 ⁻⁰³	1.20*10 ⁻⁰³	8.20*10 ⁻⁰⁵	8.24*10 ⁻⁰⁵	6.49*10 ⁻⁰⁴	6.52*10 ⁻⁰⁴	100

Tabela A.7: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 10 Hz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		1.47*10 ⁻⁰³	1.48*10 ⁻⁰³			15
7.23*10 ⁻⁰⁴	7.24*10 ⁻⁰⁴			1.62*10 ⁻⁰³	1.62*10 ⁻⁰³	20
3.50*10 ⁻⁰⁴	3.51*10 ⁻⁰⁴	3.19*10 ⁻⁰⁴	3.19*10 ⁻⁰⁴			30
5.04*10 ⁻⁰⁴	5.05*10 ⁻⁰⁴			6.20*10 ⁻⁰⁴	6.22*10 ⁻⁰⁴	40
2.55*10 ⁻⁰⁴	2.55*10 ⁻⁰⁴					50
2.98*10 ⁻⁰⁴	2.99*10 ⁻⁰⁴			5.68*10 ⁻⁰⁴	5.70*10 ⁻⁰⁴	60
5.32*10 ⁻⁰⁴	5.32*10 ⁻⁰⁴					70
3.31*10 ⁻⁰⁴	3.31*10 ⁻⁰⁴			5.31*10 ⁻⁰⁴	5.33*10 ⁻⁰⁴	80
5.21*10 ⁻⁰⁴	5.22*10 ⁻⁰⁴					90
7.85*10 ⁻⁰⁴	7.85*10 ⁻⁰⁴	9.20*10 ⁻⁰⁵	9.18*10 ⁻⁰⁵	8.73*10 ⁻⁰⁴	8.76*10 ⁻⁰⁴	100

Tabela A.8: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 50 Hz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		1.74*10 ⁻⁰³	1.75*10 ⁻⁰³			15
6.48*10 ⁻⁰⁴	6.49*10 ⁻⁰⁴			1.73*10 ⁻⁰³	1.74*10 ⁻⁰³	20
2.97*10 ⁻⁰⁴	2.97*10 ⁻⁰⁴	2.55*10 ⁻⁰⁴	2.55*10 ⁻⁰⁴			30
3.28*10 ⁻⁰⁴	3.29*10 ⁻⁰⁴			8.25*10 ⁻⁰⁴	8.26*10 ⁻⁰⁴	40
2.23*10 ⁻⁰⁴	2.23*10 ⁻⁰⁴					50
2.24*10 ⁻⁰⁴	2.24*10 ⁻⁰⁴			9.97*10 ⁻⁰⁴	9.99*10 ⁻⁰⁴	60
3.46*10 ⁻⁰⁴	3.46*10 ⁻⁰⁴					70
2.38*10 ⁻⁰⁴	2.38*10 ⁻⁰⁴			8.39*10 ⁻⁰⁴	8.40*10 ⁻⁰⁴	80
3.72*10 ⁻⁰⁴	3.72*10 ⁻⁰⁴					90
3.52*10 ⁻⁰⁴	3.52*10 ⁻⁰⁴	1.24*10 ⁻⁰⁴	1.24*10 ⁻⁰⁴	1.18*10 ⁻⁰³	1.19*10 ⁻⁰³	100

Tabela A.9: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 100 Hz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		1.35*10 ⁻⁰³	1.36*10 ⁻⁰³			15
4.91*10 ⁻⁰⁴	4.91*10 ⁻⁰⁴			1.65*10 ⁻⁰³	1.65*10 ⁻⁰³	20
2.83*10 ⁻⁰⁴	2.83*10 ⁻⁰⁴	2.43*10 ⁻⁰⁴	2.43*10 ⁻⁰⁴			30
2.88*10 ⁻⁰⁴	2.88*10 ⁻⁰⁴			8.77*10 ⁻⁰⁴	8.79*10 ⁻⁰⁴	40
2.27*10 ⁻⁰⁴	2.27*10 ⁻⁰⁴					50
2.22*10 ⁻⁰⁴	2.22*10 ⁻⁰⁴			1.10*10 ⁻⁰³	1.11*10 ⁻⁰³	60
2.80*10 ⁻⁰⁴	2.80*10 ⁻⁰⁴					70
2.27*10 ⁻⁰⁴	2.27*10 ⁻⁰⁴			9.57*10 ⁻⁰⁴	9.58*10 ⁻⁰⁴	80
3.30*10 ⁻⁰⁴	3.30*10 ⁻⁰⁴					90
2.76*10 ⁻⁰⁴	2.76*10 ⁻⁰⁴	1.34*10 ⁻⁰⁴	1.34*10 ⁻⁰⁴	1.19*10 ⁻⁰³	1.19*10 ⁻⁰³	100

Tabela A.10: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 500 Hz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		8.10*10 ⁻⁰⁴	8.11*10 ⁻⁰⁴			15
3.96*10 ⁻⁰⁴	3.96*10 ⁻⁰⁴			1.46*10 ⁻⁰³	1.46*10 ⁻⁰³	20
3.39*10 ⁻⁰⁴	3.39*10 ⁻⁰⁴	2.86*10 ⁻⁰⁴	2.86*10 ⁻⁰⁴			30
3.12*10 ⁻⁰⁴	3.12*10 ⁻⁰⁴			9.93*10 ⁻⁰⁴	9.93*10 ⁻⁰⁴	40
3.04*10 ⁻⁰⁴	3.04*10 ⁻⁰⁴					50
2.93*10 ⁻⁰⁴	2.93*10 ⁻⁰⁴			1.25*10 ⁻⁰³	1.25*10 ⁻⁰³	60
3.31*10 ⁻⁰⁴	3.31*10 ⁻⁰⁴					70
2.91*10 ⁻⁰⁴	2.91*10 ⁻⁰⁴			1.04*10 ⁻⁰³	1.04*10 ⁻⁰³	80
3.40*10 ⁻⁰⁴	3.40*10 ⁻⁰⁴					90
2.64*10 ⁻⁰⁴	2.64*10 ⁻⁰⁴	2.07*10 ⁻⁰⁴	2.07*10 ⁻⁰⁴	1.11*10 ⁻⁰³	1.11*10 ⁻⁰³	100

Tabela A.11: Valores de ε'' e $\tan(\delta)$ 1 kHz

A2		A1		D1		
$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\tan(\delta)$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	C[cm]
		6.66*10 ⁻⁰⁴	6.66*10 ⁻⁰⁴			15
4.50*10 ⁻⁰⁴	4.50*10 ⁻⁰⁴			1.47*10 ⁻⁰³	1.47*10 ⁻⁰³	20
4.23*10 ⁻⁰⁴	4.23*10 ⁻⁰⁴	3.71*10 ⁻⁰⁴	3.71*10 ⁻⁰⁴			30
3.90*10 ⁻⁰⁴	3.90*10 ⁻⁰⁴			1.08*10 ⁻⁰³	1.08*10 ⁻⁰³	40
3.89*10 ⁻⁰⁴	3.89*10 ⁻⁰⁴					50
3.81*10 ⁻⁰⁴	3.81*10 ⁻⁰⁴			1.35*10 ⁻⁰³	1.35*10 ⁻⁰³	60
4.21*10 ⁻⁰⁴	4.21*10 ⁻⁰⁴					70
3.73*10 ⁻⁰⁴	3.73*10 ⁻⁰⁴			1.13*10 ⁻⁰³	1.13*10 ⁻⁰³	80
4.11*10 ⁻⁰⁴	4.11*10 ⁻⁰⁴					90
3.30*10 ⁻⁰⁴	3.30*10 ⁻⁰⁴	3.01*10 ⁻⁰⁴	3.01*10 ⁻⁰⁴	1.11*10 ⁻⁰³	1.11*10 ⁻⁰³	100

Tabela A.12: Valores de ϵ'' e $\tan(\delta)$ a 100 mHz

$\epsilon'' [Fm^{-1}]$			C [cm]	$\tan(\delta)$		
A2	D1	A1		A2	D1	A1
$9.66 \cdot 10^{-05}$	$1.16 \cdot 10^{-03}$	$1.01 \cdot 10^{-04}$	100	$9.63 \cdot 10^{-05}$	$1.16 \cdot 10^{-03}$	$1.01 \cdot 10^{-04}$
$2.28 \cdot 10^{-03}$	$4.03 \cdot 10^{-04}$		40	$2.27 \cdot 10^{-03}$	$4.01 \cdot 10^{-04}$	
$2.43 \cdot 10^{-03}$		$7.03 \cdot 10^{-04}$	30	$2.42 \cdot 10^{-03}$		$7.02 \cdot 10^{-04}$
$2.23 \cdot 10^{-03}$	$5.88 \cdot 10^{-04}$		20	$2.22 \cdot 10^{-03}$	$2.92 \cdot 10^{-04}$	
		$2.89 \cdot 10^{-03}$	15			$2.89 \cdot 10^{-03}$

Tabela A.13: Valores de ϵ'' e $\tan(\delta)$ a 50 Hz

$\epsilon'' [Fm^{-1}]$			C [cm]	$\tan(\delta)$		
A2	D1	A1		A2	D1	A1
$1.22 \cdot 10^{-03}$	$1.17 \cdot 10^{-03}$	$1.29 \cdot 10^{-04}$	100	$1.22 \cdot 10^{-03}$	$1.17 \cdot 10^{-03}$	$1.29 \cdot 10^{-04}$
$3.21 \cdot 10^{-04}$	$4.03 \cdot 10^{-04}$		40	$3.20 \cdot 10^{-04}$	$4.01 \cdot 10^{-04}$	
$3.04 \cdot 10^{-04}$		$2.05 \cdot 10^{-04}$	30	$3.03 \cdot 10^{-04}$		$2.05 \cdot 10^{-04}$
$6.49 \cdot 10^{-04}$	$1.55 \cdot 10^{-03}$		20	$6.48 \cdot 10^{-04}$	$1.54 \cdot 10^{-03}$	
		$1.11 \cdot 10^{-03}$	15			$1.11 \cdot 10^{-03}$

Tabela A.14: Valores RC [s] a 100 mHz

A2	D1	A1	C[cm]
$1.66 \cdot 10^{+04}$	$1.66 \cdot 10^{+06}$	$1.63 \cdot 10^{+04}$	100
$4.90 \cdot 10^{+02}$			90
$5.72 \cdot 10^{+02}$	$4.41 \cdot 10^{+04}$		80
$5.54 \cdot 10^{+02}$			70
$7.04 \cdot 10^{+02}$	$4.57 \cdot 10^{+04}$		60
$6.01 \cdot 10^{+02}$			50
$7.06 \cdot 10^{+02}$	$3.88 \cdot 10^{+04}$		40
$6.57 \cdot 10^{+02}$		$2.27 \cdot 10^{+03}$	30
$8.07 \cdot 10^{+02}$	$4.23 \cdot 10^{+04}$		20
		$7.08 \cdot 10^{+02}$	15

Tabela A.15: Valores RC [ms] a 50 Hz

A2	D1	A1	C[cm]
$2.62 \cdot 10^{+03}$	$2.75 \cdot 10^{+03}$	$2.49 \cdot 10^{+04}$	100
$8.79 \cdot 10^{+03}$			90
$9.09 \cdot 10^{+03}$	$3.54 \cdot 10^{+03}$		80
$1.12 \cdot 10^{+04}$			70
$1.36 \cdot 10^{+04}$	$3.19 \cdot 10^{+03}$		60
$1.36 \cdot 10^{+04}$			50
$9.96 \cdot 10^{+03}$	$4.24 \cdot 10^{+03}$		40
$1.05 \cdot 10^{+04}$		$1.60 \cdot 10^{+04}$	30
$4.91 \cdot 10^{+03}$	$2.08 \cdot 10^{+03}$		20
		$4.28 \cdot 10^{+03}$	15

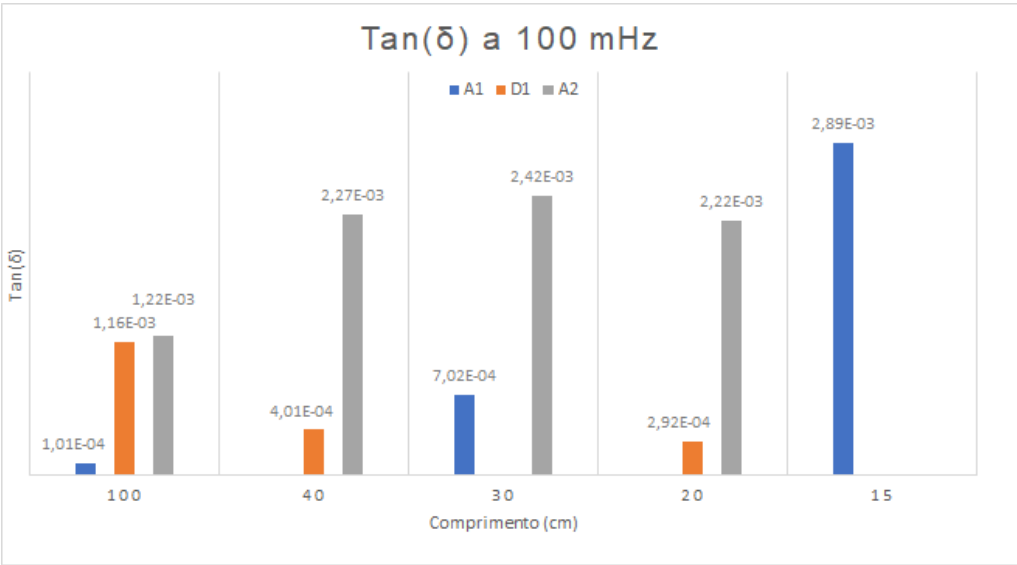


Figura A.1: Comparação da $\tan(\delta)$ das 3 amostras a 100mHz

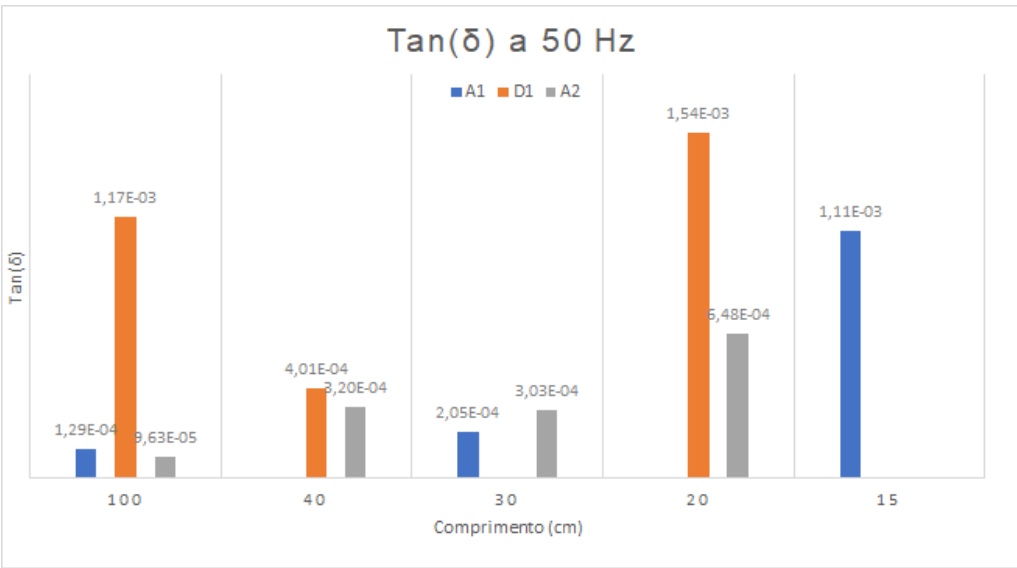


Figura A.2: Comparação da $\tan(\delta)$ das 3 amostras a 50Hz

Tabela A.16: Média de valores, a 100 mHz

Fabricante	$\tan(\delta)$	C [F]	R[T Ω]	RC [s]
A	$4.14 \cdot 10^{-03}$	$1.73 \cdot 10^{+02}$	$1.14 \cdot 10^{+01}$	$1.73 \cdot 10^{+03}$
B	$7.95 \cdot 10^{-04}$	$1.67 \cdot 10^{+02}$	$2.78 \cdot 10^{+01}$	$3.86 \cdot 10^{+03}$
C	$7.09 \cdot 10^{-03}$	$1.88 \cdot 10^{+02}$	$9.58 \cdot 10^{+00}$	$1.70 \cdot 10^{+03}$
D	$4.53 \cdot 10^{-02}$	$1.47 \cdot 10^{+02}$	$8.10 \cdot 10^{+00}$	$9.94 \cdot 10^{+02}$
Fabricante	$\varepsilon' [Fm^{-1}]$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\varepsilon [Fm^{-1}]$	
A	$1.11 \cdot 10^{+00}$	$1.12 \cdot 10^{+00}$	$2.07 \cdot 10^{+00}$	
B	$1.00 \cdot 10^{+00}$	$1.49 \cdot 10^{-03}$	$1.00 \cdot 10^{+00}$	
C	$1.14 \cdot 10^{+00}$	$2.56 \cdot 10^{-02}$	$1.14 \cdot 10^{+00}$	
D	$1.02 \cdot 10^{+00}$	$4.78 \cdot 10^{-02}$	$1.03 \cdot 10^{+00}$	

Tabela A.17: Média de valores obtidos, a 50 Hz

Fabricante	δ	C[F]	R[G Ω]	RC[ms]
A	$9.96 \cdot 10^{-03}$	$1.60 \cdot 10^{+02}$	$8.71 \cdot 10^{+01}$	$1.14 \cdot 10^{+04}$
B	$2.93 \cdot 10^{-04}$	$1.67 \cdot 10^{+02}$	$1.04 \cdot 10^{+02}$	$1.34 \cdot 10^{+04}$
C	$1.77 \cdot 10^{-02}$	$1.80 \cdot 10^{+02}$	$2.71 \cdot 10^{+01}$	$4.50 \cdot 10^{+03}$
D	$3.99 \cdot 10^{-03}$	$1.43 \cdot 10^{+02}$	$2.78 \cdot 10^{+01}$	$3.52 \cdot 10^{+03}$
Fabricante	$\varepsilon' [Fm^{-1}]$	$\varepsilon'' [Fm^{-1}]$	$\varepsilon [Fm^{-1}]$	
A	$1.01 \cdot 10^{+00}$	$5.38 \cdot 10^{-02}$	$1.01 \cdot 10^{+00}$	
B	$1.00 \cdot 10^{+00}$	$5.06 \cdot 10^{-04}$	$1.00 \cdot 10^{+00}$	
C	$1.19 \cdot 10^{+00}$	$7.80 \cdot 10^{-02}$	$1.21 \cdot 10^{+00}$	
D	$1.01 \cdot 10^{+00}$	$4.05 \cdot 10^{-03}$	$1.01 \cdot 10^{+00}$	

ANEXO I

ANEXO 1

Tabela I.1: Comparação Temperaturas Suportadas para os Diversos Polímeros de Isolação

Tipo de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo °C	Temperatura limite de sobre-carga °C	Temperatura limite de curto-circuito °C
Polietileno	70	100	160
Polietileno Reti- culado	90	130	250
Policloreto de Vi- nil	70	100	160

Figura I.1: Simbologia - Campo Descritivo dos Materiais Constituintes de um Cabo MT [21]

Condutores	Material	NP	UNE
		Símbolo	Símbolo
	Cobre macio	Nenhuma letra	Nenhuma letra
	Alumínio	L	AL (após a secção)
	Forma	Símbolo	Símbolo
	Redonda não compactada	n.a.	Nenhuma letra
	Redonda compactada	n.a.	K (após a secção)
	Sectorial	n.a.	S (após a secção)
Materiais de isolamento e bainhas	Material	Símbolo	Símbolo
	PVC	V	V
	Polietileno termoplástico	E	E
	Polietileno reticulado	X	R
Écrans metálicos	Material	Símbolo	Símbolo
	Colectivo	H	HO
	Individual	HI	H
	Em fios de cobre	O	n.a.
	Estanque	1H ou 1HI	n.a.
Revestimentos metálicos (protecção mecânica)	Materiais magnéticos	Símbolo	Símbolo
	Fitas	A	F
	Fios	R	M
	Barrinhas	M	Q
	Trança de aço galvanizado	1Q	n.a.
Revestimentos metálicos (protecção mecânica)	Materiais não magnéticos	Símbolo	Símbolo
	Fitas	1A	FA
	Fios	1R	MA
	Barrinhas	1M	QA
	Trança de cobre	Q	n.a.
Indicações diversas	Forma	Símbolo	Símbolo
	Cabos auto-suportados	S	n.a.

n.a. = Não aplicável



ANEXO 2

Figura II.1: Descrição Resumida do Ensaio com Glicerina

DESCRIÇÃO RESUMIDA DO ENSAIO
<p>Vacúolo = mancha preta, bolha, pico.</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Material necessário:</i> <ul style="list-style-type: none"> - Amostras de cabos 100 mm (préviamente preparadas no DET); - Glicerina industrial 1,2 l a 1,3 l; - Bico eléctrico; - Controlador de temperatura c/ sonda de medição (130 °C); - Acessório p/ suspensão de provete; - Reservatório de vidro 2 l; - Torno mecânico; - Microscópio USB (400 x); - Projector de perfis; • <i>Procedimento:</i> <p>Cortar amostra a ensaiar c/ aproximadamente 4 cm e fazer uma limpeza prévia da mesma. De seguida colocar a glicerina no reservatório de vidro e pôr a aquecer até atingir os 130 °C. Após a temperatura estabilizar nos 130 °C mergulhar a amostra na solução, suspensa por acessório adequado, durante 2 a 3 minutos aproximadamente (tempo necessário para a isolação se tornar completamente translúcida). Fazer inspecção visual e tirar fotos se houver detecção de qualquer vacúolo. Retirar a amostra da solução e deixá-la arrefecer. Se houver vacúolos na amostra, esta é limpa e é feito um corte em espiral no torno mecânico por forma a ficar como um “harmónio”. Desta espiral retirar uma rodela e medir o diâmetro de 2 ou 3 vacúolos com recurso ao projector de perfis e ao microscópio USB.</p> • <i>Características do equipamento mais importante:</i> <p>TORNO MECÂNICO “quantum” Maschinem – Germany Drehmaschine D250 x 550 Artikel – Nr. 3420550</p> <p>MICROSCÓPIO USB (400 x) Magnification Deluxe Model “Discovery” “vehotm” VMS – 004 (c/ CD de instalação de Software Micro-Capture)</p> <p>Nota: A glicerina industrial apresenta sinais de degradação (deve ser substituída), quando começam a surgir bolhinhas na solução.</p>

Technical Data

This section lists the *DIRANA* specifications, requirements, and standard compliance.

Table 6-1 *DIRANA* Specifications

Characteristic	Rating
Test Modes	
UST, GST, GSTg	
Voltage Source	
Measurementvoltage	±200V peak
Max. continuous output current	50 mA _{peak}
PDC	
Current Measurement	
Range	±20 mA
Resolution	0.1 pA
Inputesistance	10 k Ω
Accuracy	0.5 % ± 1 pA
FDS	
Measurementvoltage	±200V peak
Measurementcurrent	±50m A _{peak}
Dissipation Factor	
Range	0...10
Accuracy¹	
1 mHz < f < 100 Hz	1 % + 3×10 ⁻⁴
f < 1 mHz and f > 100 Hz	2 % + 5×10 ⁻⁴
Resolution	10 ⁻⁵
Capacitance	
Range	10 pF...10 μF
Accuracy	0.5 % + 1 pF
Ranges for Combined FDS and PDC Measurements	
Frequency	0.05 mHz...5 kHz

1. For capacitances > 100 pF

Figura II.2: Datos Técnicos Dirana